

場合、SDGs との相乗効果は高くなる。

2.6 知識のギャップ

2.6.3 CDR

ほとんどの 1.5°C 及び 2°C 経路は強く CDR に依存しているが、このような技術については、多くの知識のギャップが存在している。本報告書では、4 章で CDR 技術の詳細な評価を記載する。CCS の将来的な展開は不確実なものであり、BECCS と植林以外の技術は、統合的な評価手法においては、未だに正当に評価されていない。【p158】

FAQ 2.2 1.5°C までの温暖化の抑制に、エネルギーの供給と需要はどのような関係があるのか？
【p161】

GHG 排出の削減のために要求される多くの土地の変化が達成されない限りは、地球温暖化は、1.5°C 又は 2.0°C に抑制できない。排出量は、建築物、産業、輸送、エネルギー、及び AFOLU を含んだ、すべての社会の中心的な部門に渡り、急速に削減される必要がある。

3 1.5°C 地球温暖化による自然及び人間システムの調和への影響

要約

在来種の喪失のリスク、及びその結果としての絶滅のリスクは、世界の温度上昇 1.5°C の場合は、2.0°C の場合と比較して低減される【高い信頼性】。105,000 種の生物を研究した結果、2.0°C の場合、気候的に決められた地理学的な範囲で半数が絶滅すると予測されている種数（18%の昆虫、16%の植物、8%の脊椎動物）は、1.5°C の場合、6%の昆虫、8%の植物、4%の脊椎動物が絶滅するとされている【中程度の信頼性】。森林火災や外来種の分布拡大、感染症、病気といった生物多様性に関わるリスクの影響も、1.5°C の場合、2.0°C と比べ、低減される【高い信頼性】。【p179】

高緯度地域のツンドラや北方林は、特に気候変動による劣化や損失のリスクが高く、すでに、木本低木のツンドラへの侵入も発生しており【高い信頼性】、これは、さらなる温暖化により、進んでいく。地球温暖化を 2°C ではなく、1.5°C 以下に抑えることで、推定される 150 万から 250 万 km²の永久凍土地域が数世紀かけて融解するのを防ぐことができる。【p179】

高緯度における海洋種の生産力の減少のリスクや、マングローブやサンゴ礁といった生態系への影響、低緯度の漁業の生産量の減少、酸化などの海洋の化学的な変化は、1.5°C 温暖化へ抑制された際、実質的に低減されると予測されている【高い信頼性】。【p179】

漁業や養殖は、世界の食糧安全保障において重要であるが、すでに海洋の温暖化、及び酸化からの増加するリスクに直面している【中程度の信頼性】。熱帯林地域における小規模の漁業は、サンゴ礁、マングローブなどの沿岸生態系によって提供される生息域に非常に依存しているが、生息域の減少のために 1.5°C 温暖化の増加するリスクに直面することが期待されている。【p180】

土地利用、及び土地利用変化は、1.5°C に温暖化を抑えることを模索する実質全ての緩和経路で、

重要な特性として現れている。ピーク、及び今世紀末までの温暖化を 1.5°C に抑制する上で、緩和策へのポートフォリオとして、CDR、広く大部分に BECCS、及び新規植林・再植林（以下 AR）、又はどちらか一方を利用している【p180】。

大規模な、BECCS、及び AR 又はどちらか一方の展開は、広範囲にわたる土地、及び水のフットプリントを伴う。更に、BECCS、及び AR 又はどちらか一方は、一般的に、IAM に含まれていない生物物理学的なフィードバックを通じて、実質的に、地域の気候に直接影響を与える。【p180】

大規模に CDR を展開する影響は、CDR の選択肢のより幅広いポートフォリオが展開した場合や、持続可能な土地管理のための全体論的な政策が採用された場合に加え、土地、エネルギーそして物質的な資源の需要を強く制限することで、大幅に削減することができる【中程度の信頼性】。特に、再植林は、自然生態系の回復以上の意図の中で用いられた場合、かなりのコベネフィットが関係する可能性がある【高い信頼性】。【p180】

3.3 地球規模・地域の気候変動、及び関連する危険性

3.3.5 流失と河川洪水

3.3.5.1 流失と河川洪水に起因する観測された変化

観測されている河川流量、及び流失の地域的な傾向の大部分は、人為的な温室効果ガスやエアロゾルは重要となるものの、（気候システムの）内部的な数十年又は数年単位の気候変化に起因してきている（Hidalgo et al., 2009; Gu and Adler, 2013, 2015; Chiew et al., 2014; Luo et al., 2016; Gudmundsson et al., 2017）。更に、他の人類の活動もまた、水循環に影響を与える。いくつかの研究は、土地被覆又は土地利用（主に森林減少）による流失の増加は、灌漑からの減少により埋め合わされたものになっている事を示唆している（Gerten et al., 2008; Sterling et al., 2012）。同様に、森林、及び草地火災により、焼失面積が大きい時、流域規模における水文学的な反応が変化する（Versini et al., 2013; Springer et al., 2015; Wine and Cadol, 2016）。【p201】

3.3.9 海水位

Box 3.3 過去の温暖気候の教訓

過去の温暖化事象の期間に、生態系とバイオームの分布は、海洋、及び陸地でともに大きく変わった。例えば、サバンナが拡大する一方で、熱帯林及び温帯林のいくつかは乾燥の増加により後退した（Dowsett et al., 2016）。【p201】

3.4 自然・人間システムにおける観測された影響、及び予測されたリスク

3.4.2 淡水資源（定量、及び定性）

3.4.2.4 水質

IPCC 第5次評価報告書以降、多くの研究により、気候変動が、湖、流域、及び地域の水質の様々な指標に影響を与えていることが発見されている（e.g., Patiño et al., 2014; Aguilera et al., 2015;

Watts et al., 2015; Marszelewski and Pius, 2016; Capo et al., 2017)。1.5°C 温暖化と 2°C 温暖化の下で、Trang et al. (2017) は、2 つの土地利用変化のシナリオ ((i)森林から草地への転用、(ii)森林から農地への転用) を組み合わせることで、2030 年における年間の窒素とリンの産出量を予測した。【p215～216】

3.4.3 陸域、及び湿地の生態系

3.4.3.1 生物群系移行

19 の大循環モデル (GCMs) から予測された気候により引き出される 7 つの動的植生モデル (Dynamic Vegetation Models) の全体から、2°C 温暖化では、13%のバイオームが移行するのに対し、1°C では 4%のみである、1.5°C では 6.5%となっている [中程度の信頼性]。Seddon et al. (2016) は、ツンドラから熱帯雨林にかけた大陸のほぼ全体における気候変動に対して生態学的に脆弱な地域を量的に特定した。【p216】

3.4.3.2 生物季節学における変化

最近の数十年間に、気候変動により北半球の緯度 30°から 72°の間のほとんどの生態系における動植物の、春季の生物季節学的な変化が 10 年当たり 2.8 ± 0.35 日前進している [高い信頼性] (Settele et al., 2014)。熱帯雨林における生物季節学は湿度ストレスに、より応答するのに対し (Zhou et al., 2014)、局地的な温暖化のために、その変化の割合は北極圏において特に高い (Oberbauer et al., 2013)。【p216】

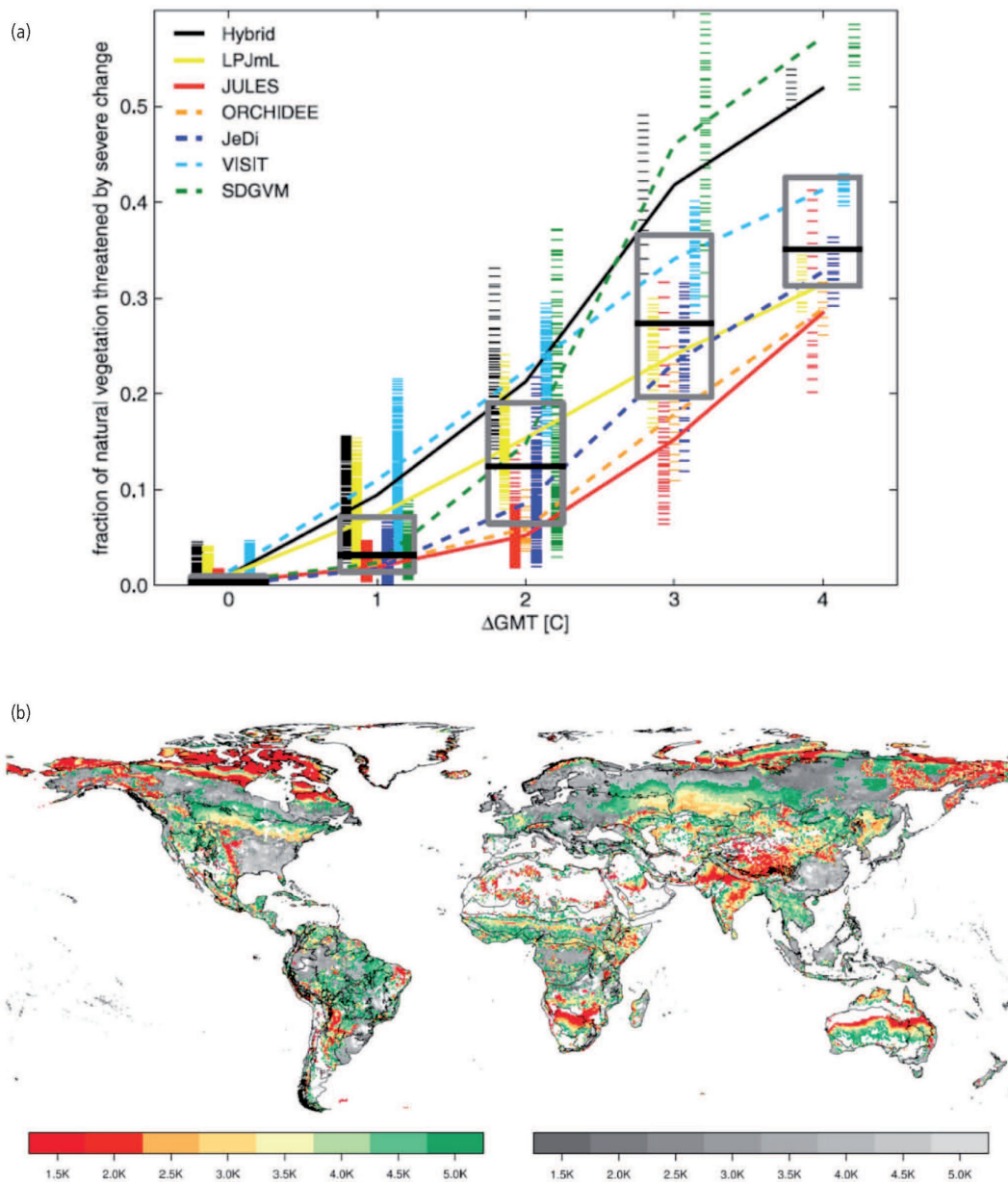


Figure 3.16 (a)すべての生態系、モデル、地球気候変動モデル及び代表的濃度経路（RCPs）の地球平均気温の結果として、深刻な生態系の変化のリスクにある地球規模の自然植生（管理された森林を含む）のしめす変動。

色は異なる生態系モデルを表しており、わかりやすくするために水平方向に分けられている。結果は単位度数びんで集計され、ある年の気温は、その年を中心とした 30 年間の枠の平均値である。ボックスの幅は、全体にわたる 25%、及び 75%のパーセンタイル値を示している。短い横縞は個々の（年間の）データポイントを表し、曲線は各びんの生態系モデルごとの平均値を結んでいる。実線（破線）の曲線は、動的な植生組成変化がある（及びない）モデルのものである。出典：（Warszawski et al., 2013）。

(b)産業革命以前のレベルを超えた地球温度の異常値の閾値レベル。

地球温度の異常値は陸域の生態系の局所的な著しい変化をもたらす。90 の生物地理学的地域に言及し、強度（色付き）又は中等度（灰色がかった）の生態系の変容を示す地域をあらわす。すべての値は、シミュレーションの 50%以上で見られる変化を示す。出典：Gerten et al., 2013)。濃い赤でしめされた地域は、地球温暖化が 1.5°C の場合に深刻な変化が起これと予測され、薄い赤でしめされた地域は 2°C を超えない場合には深刻な変化が起これないと予測される。【p217】

〈使用モデル〉

Hybrid：複合モデル

LPJmL：Lund-Postdam-Jena managed Land model

JULES：Joint United Kingdom Land Environment Simulator

ORCHIDEE：ORgainising Carbon and Hydrology In Dynamic EcosystEms model

JeDi：Jena Diversity-Dynamic Global Vegetation Model

VISIT：Vegetation Integrative Simulator for Trace Gases

SDGVM：Sheffield Dynamic Global vegetation Model

気候変動に対する生物季節学上の反応の差異により、種間の相互作用を分離する可能性が十分にある（Settele et al., 2014）。異なった反応は、温帯林の群落構造を変化させる可能性がある（Roberts et al., 2015）。特に、温帯林の生物季節学は 2010～2039 年の間に 14.3 日、2040～2069 年の間に 24.6 日前進すると予測されている。【p218】

3.4.3.3 種の範囲、存在量及び絶滅の変化

IPCC 第 5 次評価報告書の第 2 作業部会（Settele et al., 2014）では、地球規模における陸域生態系の生産性は産業革命前と比較して、増加したという【高い信頼性】があることを結論付けている。【p219】

3.4.3.4 生態系機能、バイオマス及び炭素蓄積の変化

より高温と関連した、春、及び秋における生態系全体の呼吸量の増加は、北方林を炭素吸収源から炭素排出源へ変える可能性がある（Hadden and Grell, 2016）。例えば、北方の泥炭地では、上昇した気温は炭素貯留を減少させ、泥炭地の安定性を損う可能性がある（Dieleman et al., 2016）。更に、J. Yang et al.（2015）は、泥炭地や熱帯雨林のような大きな炭素貯留を伴う生態系において、火災による炭素吸収源の減少を示している。結果として、適応の目的では、炭素吸収源、特に水、エネルギー、及び炭素循環の主要な規制因子である森林を増強していく必要がある（Ellison et al., 2017）。Gang et al.（2015）は、温帯林の純一次生産量における強い増加を予測しているが、Ahlström et al.（2012）は、この影響は分解の増加により、相殺、又は反転される可能性があるとしている。【p219】

3.4.3.5 地域及び生態系特有のリスク

山岳生態系、高い生物多様性を伴った熱帯湿潤林・熱帯乾燥林、砂漠、淡水システム、及び砂丘システムを含む数多くの絶滅の危機にさらされたシステムが、IPCC 第 5 次評価報告書の中で評価された。これらには、ヨーロッパの地中海、シベリア、アジアの熱帯及び砂漠の生態系、オーストラリアの熱帯雨林、南アメリカのフィンボスとカルー、そして、エチオピア、マラウィ、ザンビア及びジンバブエの湿地が含まれている。これらすべてのシステムにおいて、2°C 温暖化の場合、1.5°C 温暖化より影響が大きくなることが推定されている【中程度の信頼性】。【p219】

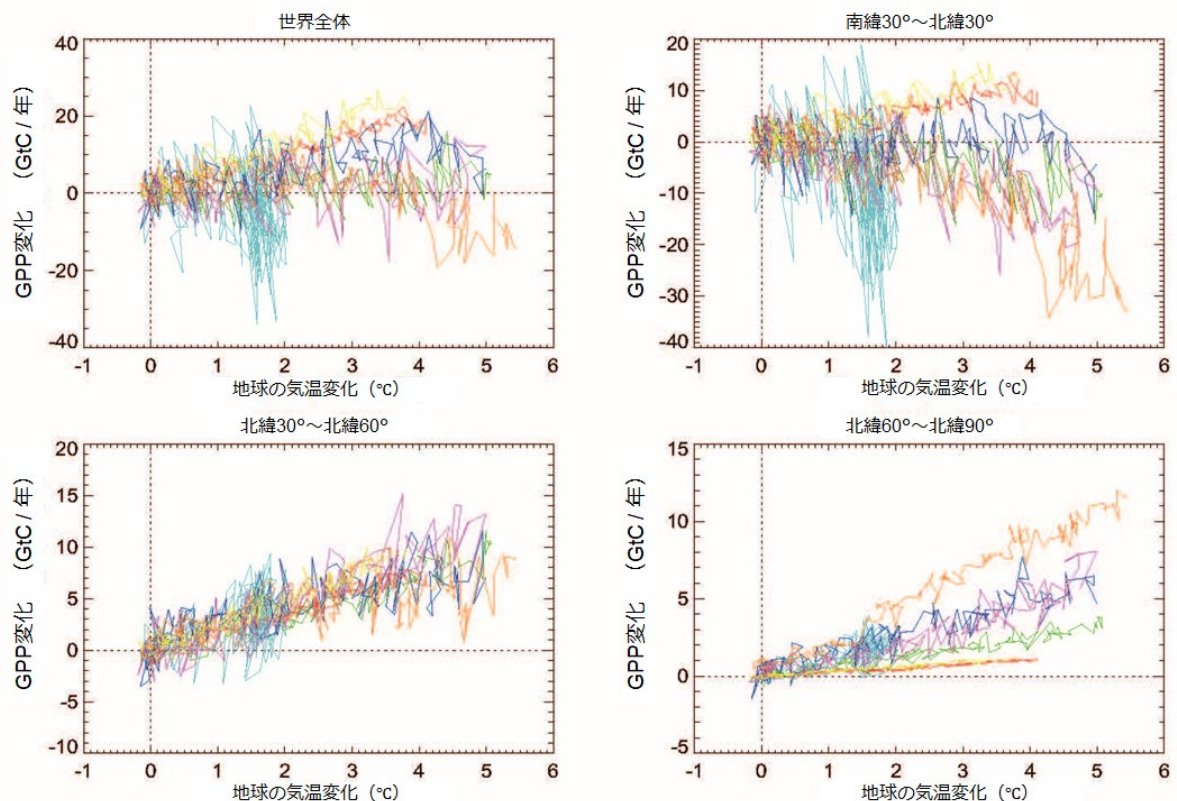


Figure 3.17 全世界（左上）と3つの緯度地域における気候変動に対する陸域の生産性（総一次生産性、図中 GPP）の応答【p220】

北緯 30 度、南緯 30 度、北緯 30～60 度、北緯 60～90 度。データは、Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) アーカイブ (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) からの引用。Norwegian Earth System Model (NorESM-ME, 黄色) ; Community Earth System Model (CESM, 赤) ; Institute Pierre Simon Laplace (IPSL) -CM5-LR (藍色) ; Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL, 水色) ; Max Plank Institute-Earth System Model (MPI-ESM, 桃色) ; Hadley Centre New Global Environmental Model 2-Earth System (HadGEM2-ES, オレンジ) ; and Canadian Earth System Model 2 (CanESM2, 緑)。これらのモデリングは、産業革命以前から、年間あたりに、CO₂が 1%ずつ増加することにより、世界の平均気温が増加する想定に対応して作成されている。

気候変動が起きたときの森林へ予測され得る影響は、嵐、自然火災、及び病害虫の発生の強度が増加する事も含めており（Settele et al., 2014）、森林を枯死させることにつながる可能性がある〔中程度の信頼性〕。より温暖で湿潤な気候は、嵐、及び病原体の攪乱を増加させる一方で、より温暖で乾燥した気候は、とりわけ、火災、干ばつ、及び昆虫による攪乱を促進する（Seidl et al., 2017）。シミュレーションの中に攪乱を含めると、気候変動に応答したヨーロッパの森林の生産性に影響を与える可能性がある（Reyer et al., 2017b）。この更なる証拠として、アメリカ合衆国西部の森林火災は、燃料の乾燥度を高めるメカニズムにより、気候変動がないと予測された場合と比較して約2倍になったことから、1984～2015 年にかけて北アメリカの森林火災のおこった頻度の増加は、人為的な気候変動に起因するとされる（Abatzoglou and Williams, 2016）。この予測は、2010～2039 年の間に、地球規模の陸上の火災の頻度が 37.8%以上増加する事を示す火災リスクの推定と一致している（Moritz et al., 2012）。【p220】

アマゾンの熱帯雨林は、その気候的上限に近づいていることが示されているが（Hutry et al., 2005）、この閾値は CO₂ 増加の影響を受けて変動する可能性がある（Good et al., 2011）。この森林は、気候の変化、及び継続した人為的攪乱といった複数の圧力に対して、特に脆弱である可能性もある（Borma et al., 2013; Nobre et al., 2016）。モデリング（Huntingford et al., 2013）、及び観測上の制限（Cox et al., 2013）から初期の複合モデリング研究と比較して（Cox et al., 2000; Jones et al., 2009）大規模な森林の枯死の起こる可能性が、低いと指摘されている。Nobre et al. (2016) は、4°C 温暖化の気候的な閾値、及び 40%の森林減少の閾値を推定している。【p221】

中央アメリカに関しては、Lyra et al. (2017) は 3°C 地球温暖化の下で、熱帯雨林のバイオマスは 40%までに減少し、著しいサバンナと草地への転換が起こることを示している。2050 年に、地球温暖化が 1.5°C に近づく際、20%のバイオマスの減少が中央アメリカの熱帯雨林で起こることが予測されている（Lyra et al., 2017）。直線的な応答が仮定された下では、この減少は 30%に達する可能性もある〔中程度の信頼性〕。【p221】

3.4.3.5 生態系サービス関連事項の要約

泥炭地は、地上の 3%のみしか覆っていないが、世界の土壌炭素蓄積の 1/3 を占めている（400 から 600Pg）（Settele et al., 2014）。更に、コンゴ盆地（Dargie et al., 2017）とアマゾン盆地（Draper et al., 2014）において、泥炭地の炭素貯留量は、熱帯林と同等である。しかしながら、貯留された炭素は、土地利用変化や、将来の干ばつのリスクに、非常に脆弱である（例として、ブラジル北西域）〔高い信頼性〕。【p221】

3.4.4 海洋生態系

3.4.4.3 嵐と沿岸流出

熱帯地域におけるサイクロンの強度は大きくなっている〔中程度の信頼性〕（Section 3.3.6; Elsner et al., 2008; Holland and Bruyère, 2014）。より大きな嵐に伴う風や波の直接的な強制力

は、嵐の方向の変化に沿ってマングローブのような沿岸の群落、及び生態系に物理的なダメージを与えるリスクを高める〔低い～中程度の信頼性〕（Long et al., 2016; Primavera et al., 2016; Villamayor et al., 2016; Cheal et al., 2017）。【p222】

3.4.4.8 海面上昇

マングローブのような沿岸湿地生態系は、気候変動と関連しないその他のリスクや影響と同様に、海面上昇からの圧力にさらされる〔中程度の信頼性〕（Section 3.4.5; Di Nitto et al., 2014; Ellison, 2014; Lovelock et al., 2015; Mills et al., 2016; Nicholls et al., 2018）。マングローブのようないくつかの生態系は、海面上昇につれて、海岸線を移動しう一方、人為的な臨海の発展は、ダム建設などにより河川への堆積物の供給を減少させることにより、それを阻害しう（Di Nitto et al., 2014; Lovelock et al., 2015; Mills et al., 2016）。【p225】

3.4.4.10 フレームワーク生物（熱帯サンゴ、マングローブ及びと海草）

生態系エンジニアとしての海洋生物は、物理的な構造（マングローブ林など）を構築し、多くの生物の生息地を提供する（Gutiérrez et al., 2012）。これらの生物は、代りに食糧、生計、文化的重要性、そして人間社会へのサービスを提供する（Bell et al., 2011, 2018; Cinner et al., 2012; Arkema et al., 2013; Nurse et al., 2014; Wong et al., 2014; Barbier, 2015; Bell and Taylor, 2015; Hoegh-Guldberg et al., 2015; Mycoo, 2017; Pecl et al., 2017）。

マングローブ生態系への気候変動の影響のリスクは、近年、Short et al.（2016）に組織された専門家グループによって調査された。なお、他の文献によるとマングローブのように出現する群落は、海面の変化と海水の極端な温度に最も影響されやすい（Di Nitto et al., 2014; Sierra-Correa and Cantera Kintz, 2015; Osorio et al., 2016; Sasmito et al., 2016）。とりわけ、（このような影響の要因は）堆積物を減らすこと（Lovelock et al., 2015）、又は海岸のインフラ建設を通じたマングローブの陸への移動を制限することの人間活動に一致する。これは、その後、沿岸生態系が、海洋の条件と海岸インフラの間で閉じ込められてしまう、「沿岸の圧迫（Coastal Squeeze）」を導く（Mills et al., 2016）。

本特別報告書に先立つマングローブへの気候リスクの一般的な評価は、気候変動からのリスクよりも森林減少や持続不可能な沿岸開発からのさらに大きなリスクに向き合うと報告していた（Alongi, 2008; Hoegh-Guldberg et al., 2014; Gattuso et al., 2015）。しかしながら、近年の大規模な枯死（Duke et al., 2017; Lovelock et al., 2017）は、マングローブについても、気候変動からのリスクを過小評価している可能性があるとし唆されている。過去 3 年の事象から、リスクは適度なものと検出されないと考えられている。結果として、地球温暖化が産業革命前より平均 1.3°C 上昇した場合、マングローブへの気候変動のリスクは適度になると予測される。気候変動からのマングローブへのリスクは、信頼性は低いにもかかわらず、適度なものであると予測される。【p225～226】

マングローブのような変化する生態系に伴った海岸インフラを統合することは、海面上昇とともにマングローブが陸へ移動するにつれて、適応策の戦略を提供しう〔高い信頼性〕。海岸地域に堆積物の供給を維持することは、海面の上昇に併せて、マングローブの移動のペースを保つことを助けるであろう

(Shearman et al., 2013; Lovelock et al., 2015; Sasmito et al., 2016)。この理由により、マングローブのための生息域は、ダムを建設するなどの、堆積物をせき止める人為的活動に強く影響され、海面上昇から逃れる能力にも影響する(Lovelock et al., 2015)。さらに、海岸地域の統合的管理は、マングローブのような自然生態系を使うことの重要性や経済的妥当性を認識する必要がある(Arkema et al., 2013; Temmerman et al., 2013; Ferrario et al., 2014; Hinkel et al., 2014; Elliff and Silva, 2017)。【p226】

3.4.4.12 主要な生態系サービス（例：炭素吸収、沿岸保護、及び熱帯のサンゴ礁のレクリエーション）

海洋は、重要なサービスを提供している。その中には、海洋と大気の境界を超えたガス交換を通じて、また、マングローブのような生態系に関連した植生、及び土壌の炭素貯留により、大気組成の調整を含んでいる。海岸保全は、マングローブのような自然の防壁によって提供されるサービスである。また、これは海面上昇や、大波、強烈な嵐に関連した影響に対する人間社会やインフラストラクチャーを保全する上で重要である〔高い信頼性〕(Gutiérrez et al., 2012; Kennedy et al., 2013; Ferrario et al., 2014; Barbier, 2015; Cooper et al., 2016; Hauer et al., 2016; Narayan et al., 2016)。自然及び人為的な海岸保全は、これらの影響を減退させる可能性がある(Fu and Song, 2017)。マングローブも、沿岸のコミュニティへ資源を提供することに加えて、海岸保全に重要な役割を担っているが、気候変動による、及び堆積物の減少、又は陸に移動することへの障害などの要因による海面上昇に追いつくことのできない程度リスクにすでにさらされている(Saunders et al., 2014; Lovelock et al., 2015)。これは、現在マングローブに保全されている地域が徐々にリスクにさらされることを意味している。【p227】

減少した海岸保全に向けた適応のための戦略は、(a)脆弱な地域と危険の回避、(b)危機に瀕した地域からの管理された避難、及び(c)影響の便宜とサービスの損失の又はどちらか一方を含むを含んでいる(Bell, 2012; André et al., 2016; Cooper et al., 2016; Mills et al., 2016; Raabe and Stumpf, 2016; Fu and Song, 2017)。このような幅広い選択肢の中で、自然発生的な、蠣の養殖所、サンゴ礁、マングローブ、海藻、そして他の生態系を含んだ海岸保全を増強するための機会を利用する(UNEP-WCMC, 2006; Scyphers et al., 2011; Zhang et al., 2012; Ferrario et al., 2014; Cooper et al., 2016)。自然生態系は、健全な際、被害を受けた後の自己修復能力を持つ(Barbier, 2015; Elliff and Silva, 2017)。【p229】

3.4.5 海岸と低地域及び海面上昇

3.4.5.7 沿岸変化への適応

マングローブの生態系は、海面上昇とともに陸へ向かって移動しうるが、沿岸開発はこれを阻害する。これらの課題に対処する選択肢は、観光事業、漁業、沿岸開発、及び持続不可能な養殖/農業などのその他の圧力の影響を減らすことを含んでいる。いくつかの場合において、沿岸の生息域と生態系の回復は、海面上昇から受ける水位の上昇からの変化、嵐の条件の変化、沿岸の浸水、及び塩類化に対応する費用効果の高い手法になりえる(Arkema et al., 2013; Temmerman et al., 2013; Ferrario et

al., 2014; Hinkel et al., 2014; Spalding et al., 2014; Elliff and Silva, 2017) 。【p233】

3.4.6 食糧・栄養安全保障、及び食糧生産システム（漁業、養殖を含む）

3.4.6.3 漁業及び養殖の生産

2015 年から 2017 年までの研究によると、重要な種の生物地理における急速な変化からの脅威（Poloczanska et al., 2013, 2016; Burrows et al., 2014; García Molinos et al., 2015） 、及びサンゴ礁・海藻・マングローブのような重要な生態系の急速な劣化の進行（Section 3.4.4, Box 3.4）が示されている。これらの変化の加速は、汚染などの気候変動とは関連のない圧力とともに生じ、食糧資源を維持する上で要求される持続可能な十分な漁獲量レベル以下に、多くの小規模漁業をおくことを余儀なくさせる（McClanahan et al., 2009, 2015; Cheung et al., 2010; Pendleton et al., 2016） 。結果として、気候変動や地球規模の人口増加を取り巻く将来的なシナリオは、太平洋（Bell et al., 2013, 2018） やインド洋（McClanahan et al., 2015） などの多くの地域の魚由来のタンパク源の不足を予想している。【p237】

3.5 2°C 温暖化と比較した、1.5°C 温暖化における避けられる影響、及び低減されるリスク

3.5.2 2°C 温暖化に対する 1.5°C 温暖化の避けられる影響と低減されるリスクの集約

3.5.2.1 ユニークで脅威にさらされているシステム

山岳生態系、高い生物多様性を伴った熱帯湿潤林・熱帯乾燥林、砂漠、淡水システム、及び砂丘システムを含む数多くの絶滅の危機にさらされたシステムがIPCC 第5次評価報告書の中で特定された。これらには、ヨーロッパの地中海、シベリア、アジアの熱帯及び砂漠の生態系、オーストラリアの熱帯雨林、南アメリカのフィンボスとカルー、そして、エチオピア、マラウィ、ザンビア及びジンバブエの湿地が含まれている。これらすべてのシステムにおいて、2°C 温暖化の場合、1.5°C 温暖化より影響が大きくなることが推定されている【中程度の信頼性】。【p254】

3.5.5 より野心的な地球規模の気温目標達成による地域的な転換点の回避

3.5.5.2 ツンドラ

ツンドラの優占する景観における樹木の成長は、何日間にもわたる氷点下の気温により、強く制限されている。可能性のある転換点は、樹木の変動が著しく増加してしまう程、氷点下の日数が減少してしまうことにある。ツンドラの景観は、前世紀に渡って、火災や永久凍土の劣化と連結することで（Bring et al., 2016; DeBeer et al., 2016; Jiang et al., 2016; Yang et al., 2016） 、地球全体の平均よりも温暖化が進んでいる（Settele et al., 2014） 。これらの過程は、ツンドラ地域で樹木種が定着し、最終的にツンドラから北方林へと遷移する条件を促進する。急激な変化は、2°C 以上の著しい温暖化のレベルの下でのみ、永久凍土の崩壊と結びついて起こりうる【低い信頼性】（Drijfhout et al., 2015） 。【p262】

3.5.5.6 雨林

世界最大の熱帯雨林における大部分の降水は再循環する (e.g., Lenton et al., 2008)、そしてこのことは、森林減少が、顕著な森林の立ち枯れにつながるとともに、減少した森林被覆における閾値の引き金となるといった懸念を引き起こす。アマゾンでは、この森林減少の閾値は 40% であると推定されている (Nobre et al., 2016)。地球温暖化の下での増加した火災の頻発は、とりわけエルニーニョにより引き起こされた干ばつの期間、森林減少の加速との相互作用の起こる可能性がある (Lenton et al., 2008; Nobre et al., 2016)。3°C の地球温暖化は、中央アメリカの熱帯雨林のバイオマス量をおよそ 40% まで減少させながら、面積を減少させると予測されており、このことは、広大な熱帯雨林が、サバンナや草地に転換することを引き起こす可能性がある (Lyra et al., 2017)。全体として、バイオマスの著しい減少は、1.5~2°C の温暖化で起こりうるが、モデリング (Huntingford et al., 2013)、及び観測上の制限 (Cox et al., 2013) から、顕著な熱帯雨林の枯死は、3~4°C でのみ引き起こされることが示唆された [中程度の信頼性]。【p263】

3.5.5.7 北方林

北方林は、地球規模平均より強い地域的な温暖化になると予想されている (IPCC 第 5 次評価報告書第 2 作業部会; Collins et al., 2013)。火災、病害虫、及び熱に関連した枯死率による攪乱の増加は、とりわけ、北方林の南限に影響を与える可能性がある [中程度の信頼性] (Gauthier et al., 2015)。これらの影響は、さらなる温暖化により発生し、したがって、2°C 温暖化は 1.5°C よりも影響が大きくなると予測されている [中程度の信頼性]。北方林が著しく枯死する転換点は、増加した樹木の枯死率が、開放された林地や草地を作りだし、さらなる地域的な温暖化、及び増加した火災の頻発を促して、強力な正のフィードバックメカニズムを引き起こすことにある (Lenton et al., 2008; Lenton, 2012)。この転換点は、3°C から 4°C の間に存在すると推定されているが [低い信頼性] (Lucht et al., 2006; Kriegler et al., 2009)、様々な強制力のメカニズムやフィードバックプロセスの複雑さがあり、不確実な推定である。【p263】

Table 3.7 様々な地球の気温目標における地域の転換点を超過するリスクの増大【p264】

転換点	1.5°C以下の温暖化	1.5-2°Cの温暖化	3°C以上の温暖化
ツンドラ	氷点下となる日数が減少。 急激な樹木被覆の増加の可能性は低い。	氷点下となる日数のさらなる減少。 急激な森林被覆の増加の可能性は低い。	断片的な森林被覆の増加の可能性（低い確信）。
雨林	バイオマスの減少、森林減少と火災の増加は森林をダイバックへの不確実なリスクに晒す。	1.5°C温暖化と比較して大規模なバイオマスの減少。森林減少と火災の増加は森林をダイバックへの不確実なリスクに晒す。	中央アメリカにおける広大な熱帯雨林の減少と熱帯雨林のサバンナや草原への大規模な転換。 潜在的な転換点は、大規模な森林の枯死によって引き起こされる（中程度の確信）。
北方林	北方林の南限における樹木枯死の増加（中程度の確信）。	北方林の南限におけるさらなる樹木枯死の増加（中程度の確信）。	北方林の顕著な枯死の潜在的な転換点は3°C~4°Cである。（低い確信）。

3.6 1.5°C、及び 2°C の異なる経路の影響

3.6.2 非 CO₂ の影響、及び緩和経路の予測されるリスク

3.6.2.1 緩和経路の土地利用変化から生じるリスク

緩和経路の中で、土地利用変化は多くの異なる緩和策により影響を受ける。熱帯雨林のような、炭素の豊富な生態系を保全することは、農業拡大の面積を制限する。また、BECCS、AR などの土地を必要とする CDR 手法は、ほとんどの 1.5°C 経路、2°C 経路において、重要な役割を持っている。大多数の文献は、大規模な CDR 利用の可能性のある重要性について探求している。この場合、今世紀末までの対応する土地フットプリントは、非常に大きく、18%の土地面積は使われる推定となっている（Wiltshire and Davies-Barnard, 2015）。原生林や自然の草地の消失の著しい加速は（Williamson, 2016）、温室効果ガスの増加に至り（P. Smith et al., 2013, 2015）、現在の森林面積の 10%までがバイオ燃料へと消失する可能性がある（Yamagata et al., 2018）。【p265】

3.3 GtC/ha の固定に対し、970 Mha の新規植林・再植林が必要となる（Smith et al., 2015）。Humpeöder et al.（2014）は、温暖化を 2°C に抑える中で、最もコストがかからない経路においては、今世紀末までに 2800 Mha の植林が必要となることを推定している。したがって、たとえ最もコストの低い緩和が新規植林・再植林によって実行された場合にも、土地の総量は、BECCS によって要求されるものの 3~5 倍になる可能性があり、森林管理の利用に依存したものとなる。しかしながら、全ての CDR の土地フットプリントが、生物多様性の保全との競合の中で必要とされるわけではない。再植林が、自然生態系の回復となる場所では、それは、炭素の固定、及び生物多様性・生態系サービスの保護することの双方の利益を生み、生物多様性条約（CBD）のもとにある愛知目標の達成に貢献する（Leadley et al., 2016）。しかしながら、再植林はこのようにしばしば定義されておらず（Stanturf et al., 2014）、再植林のはっきりとした特徴は、生物多様性に利益をもたらることにある。つまりは、再植林は、

異なる状況で異なる役割を持ち、原始的な生態系の回復というよりは、アグロフォレストリーを含むことが多い（Pistorious and Kiff, 2017）。しかしながら、「自然気候解決策（'natural climate solutions'）」は、地球規模の森林、湿地、草地、そして農地に渡る、炭素貯留の増加、及び温室効果ガス排出の回避又はどちらか一方で、保護、回復、そして土地管理の行動として定義される。「自然気候解決策」は、2°C 以下の温暖化を 66% 以上の確率で維持するために、2030 年までに南ヨーロッパ、及び地中海地域で必要とされる費用対効果のある CO₂ 緩和の 37% を潜在的に提供する（Griscom et al., 2017）。【p265】

生態系が気候変動に適応できるように注意深い土地管理が必要である一方、食糧供給のためにはさらなる土地が必要となる。しかしながら、将来的な森林減少率は現存の文献では過小評価している可能性があり（Mahowald et al., 2017）、再植林は、そのために自然生態系の再生が実行されることで、大きな相互利益につながる【高い信頼性】。【p266】

3.6.2.2 土地利用の変化に関連する地域の気候に関する生物物理学的フィードバック

土地表面の生物物理学的な性質の変化は地域的な気候変動に影響する。これは、農業の拡大・集約化（e.g., Mueller et al., 2016）、再植林・再植生化への取り組み（e.g., Feng et al., 2016; Sonntag et al., 2016; Bright et al., 2017）、及び土地管理における変化（e.g., Luysaert et al., 2014; Hirsch et al., 2017）を含む。【p266】

気候における土地利用変化と土地管理の生物物理学的フィードバックに加え、特定の生態系サービスへの潜在的な重要さも存在する。これには、気候変動に誘発されることによる作物収穫量における変化を含んでおり、再植林緩和行動、BECCS のための作物成長、及び大きな人口を支える食糧生産、並びに都市拡大との間に生じる耕作適地の需要の競合により、作物収穫量がさらに悪化する（e.g., Schlenker and Roberts, 2009; van der Velde et al., 2012; Asseng et al., 2013, 2015; Butler and Huybers, 2013; Lobell et al., 2014）。【p267】

Cross-Chapter Box 7 1.5°C 地球温暖化と関連した土地ベースの CDR

土地利用に関係した GHG フラックスは、AFOLU 部門で報告されており、人為的な GHG 排出量の約 25%（約 10～12 GtCO₂eq/年）を占めている（P. Smith et al., 2014）。したがって、土地利用の排出量は、特に、森林減少、新規植林、施肥、灌漑、収穫そして、農地、牧草地及び家畜管理のような人為的な行動により影響を受けるため、（Paustian et al., 2006; Griscom et al., 2017; Houghton and Nassikas, 2018）土地利用、及び土地利用変化からの排出量を削減は、低排出緩和経路において重要な要素となっている（Clarle et al., 2014）。【p268】

IPCC 第 5 次評価報告書では、大部分のシナリオにおいて 2100 年までに 66%、又はそれ以上の確率で温暖化を 2°C 以下にすると評価し、特に、2100 年において約 10 GtCO₂/年、又は 21 世紀にかけて約 200～400 GtCO₂ を CDR の対象とする CDR が含まれている。（Smith et al., 2015; van Vuuren et al., 2016）。これらの IAM の結果は、主に、BECCS、及び AR 又はどちらか一方を用いることで達成される。ピーク、又は今世紀末の温暖化が 1.5°C に収まるシナリオは、実質的に全て土地集約

的な CDR 技術を採用している (Rogelj et al., 2015; Holz et al., 2017; Kriegler et al., 2017; Fuss et al., 2018; van Vuuren et al., 2018)。これにおいても、AR 及び BECCS が大半を占めている。【p268】

Cross-Chapter Box 7, Table 1 は、本報告書で評価されている 5 つの CDR の比較を表わす。これは、2100 年に、BECCS、及び AR が 12 GtCO₂/年 の規模で展開される場合、相当な土地フットプリント・水フットプリントが必要になることを説明している。このフットプリントが、例として生態系、又は食糧生産に負の影響をもたらすかどうかは、土地の炭素蓄積の保護、自然生態系の犠牲に立つ農業の拡大制限、及び農業の生産性向上を行う手法の有効性、及び実在に大きく依存している (Bonsch et al., 2016; Obersteiner et al., 2016; Bertram et al., 2018; Humpenöder et al., 2018)。【p269】

土地集約的な CDR 技術のスケールアップと実施に向けた技術的、政治的、及び社会的実現可能性には、将来的展開に重大かつ潜在的な障壁を示すことが理解されている (Boucher et al., 2013a; Fuss et al., 2014, 2018; Anderson and Peters, 2016; Vaughan and Gough, 2016; Williamson, 2016; Minx et al., 2017, 2018; Nemet et al., 2018; Strefler et al., 2018; Vaughan et al., 2018)。これらの障壁を乗り越えることが困難な場合、CDR の選択肢を制限する影響を調査するために、IAM 研究では、BECCS とバイオエネルギーの利用を制限するシナリオ (Krey et al., 2014; Bauer et al., 2018; Rogelj et al., 2018)、又は BECCS と新規植林の利用を制限するシナリオを開発してきた (Strefler et al., 2018)。CDR へのさらなる依存を制限するための代替的戦略も、検証されてきており、その中には、電化の増加、農業の集約化、エネルギー及び素材効率の劇的な改善などが含まれている (Bauer et al., 2018; Grubler et al., 2018; van Vuuren et al., 2018)。わずかながら反直観的に、BECCS の展開を制限することを模索するシナリオは、さらに大きなバイオエネルギーと新規植林の展開を通じて、土地利用を増加させる結果となっている (Chapter 2, Box 2.1; Krey et al., 2014; Krause et al., 2017; Bauer et al., 2018; Rogelj et al., 2018)。【p269】

新規植林・再植林は、生物多様性、炭素固定、及び水利用の間にトレードオフな関係を示す可能性があり、これらの戦略は、CO₂ 吸収 1 トン当たりにより高い土地フットプリントを抱えている (Cunningham, 2015; Naudts et al., 2016; Smith et al., 2018)。例えば、森林管理を早期に成長する樹種を優先する戦略に変えた場合、より多くの残材の収穫や短い伐期は生物多様性に負の影響を与えうる (de Jong et al., 2014)。対照的に、在来樹種を用いた荒廃地の再植林は、実質的な利益を生物多様性にもたらす可能性がある。これらの制限にかかわらず、改善した土地管理手法を通じた炭素固定の増大への可能性は現実的であると考えられる (Griscom et al., 2017)。【p269】

キーマッセージ：

ピーク時、又は今世紀末の温暖化が 1.5°C に収まる費用対効果的な戦略は全て、AFOLU 部門における強化された GHG 吸収を手法のポートフォリオの一部として含んでいる [高い信頼性]。【p270】

土地ベース CDR の大規模展開は、土地及び水の利用可能性にさらなる影響を与える [高い信頼性]。これは、食糧生産、生物多様性、及びその他の生態系サービスの提供に影響を与える [高い信頼性]。

CDR の選択枝のポートフォリオがさらに幅広く展開した場合、及び土地、エネルギーや物質資源への需要を強く制限することに焦点を当てた緩和努力が大きくなされた場合に、土地ベース CDR の大規模な展開の影響は、低減できる可能性がある〔中程度の信頼性〕。【p270】

新規植・再植林は、適切に実施された場合、大きな相互利益につながる可能性があるが、大規模に展開された場合、土地フットプリント・水フットプリントを著しくする可能性がある〔中程度の信頼性〕。【p270】

Cross-Chapter Box 7, Table 1 土地ベースの CDR 手法の比較【p270】

アルベドの変化以外の土地ベース CDR の生物物理学的影響（灌漑に関係した蒸発を通じた変化など）は含まれていないことに注意。

選択枝	ポテンシャル	コスト	要求される土地	要求される水	栄養への影響	アルベドへの影響	飽和と持続性
単位	GtCO ₂ /年	\$/tCO ₂	Mha/GtCO ₂	km ³ /GtCO ₂	Mt N,P,K/年	単位なし	単位なし
BECCS	0.5-5.0	100-200	31-58	60	様々	様々；どのようなバイオ燃料を使うか（森林より高いアルベドの作物）と土地管理（作物の不耕起栽培など）による。	貯蔵の長期のガバナンス戦略；バイオエネルギーの生産速度の制限及び炭素固定。
新規植林・再植林	0.5-3.6	5-50	80	92	0.5	負が減少したGHGの利益によっては負でなくなる。	森林の飽和；攪乱への脆弱性；ポストAR森林管理が必要。
強化風化	2.0-4.0	50-200	3	0.4	0	0	土壌の飽和；月から地理学的タイムスケールへの残留期間。
バイオ炭	0.3-2.0	30-120	16-100	0	N: 8.2 P: 2.7 K: 19.1	0.08-0.12	数十年から数百年に渡る平均残留、土壌タイプ、管理および環境条件による。
土壌炭素貯留	2.3-5.0	0-100	0	0	N: 21.8 P: 5.5 K: 4.1	0	不適切な管理が進んだ場合、土壌吸収源が飽和及び逆転する可能性。

3.7 知識のギャップ

3.7.2 理解におけるギャップ

3.7.2.1 地球システム及び 1.5°C 地球温暖化

森林被覆変化、食糧生産、バイオ燃料生産、BECCS、及び関連する定量化できない生物物理学的影響からのフィードバックといった、低排出シナリオへの土地利用/被覆における変化と関連したフィードバック。【p272】

Cross-Chapter Box 8 1.5°C 温暖化の世界

重要な問題：

地球全体の表面平均温度は、CO₂の累積排出量に応答していることから、1.5°C 温暖化安定へ向け