

気候変動に伴う斜面崩壊に起因した 土砂生産量の推計

ESTIMATED SEDIMENT PRODUCE CAUSED BY SLOPE FAILURE
DUE TO CLIMATE CHANGE

川越清樹¹・小野桂介²・青木春奈³
Seiki KAWAGOE, Keisuke ONO and Haruna AOKI

¹正会員 博士(環境科学) 福島大学大学院共生システム理工学研究科 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1番地)

²学生会員 工学士 東北大学大学院工学研究科土木専攻 (〒160 東京都新宿区三矢六丁目13-5)

³非会員 理工学士 (元)福島大学共生システム理工類 (〒960-1296 福島県福島市金谷川1番地)

We tried to evaluate basins sediment production in future by using GCM (General Circulation model) outputs and digital numerical information. Basins sediment production based calculation on slope failure probability model and sediment produce estimation model. The radius of sediment production is obtained by sediment produce estimation model using some GCM outputs and SRES (Special Report on Emissions Scenarios).

The results obtained are as follows; 1) Japan northern areas are estimated a lot of sediment production due to occurrence increase maximum daily extreme, 2) Sediment production increases remarkably by changing Future climate condition (2081-2100).

Key Words : *Special report on emissions scenarios ,General circulation models, probability, basins*

1. はじめに

世界各国の研究された数値気候モデルの出力結果から気候システムの温暖化に伴う豪雨の量と頻度の増加が見積もられ¹⁾, 地球環境のリスク増加が指摘されている²⁾. 我が国は, 太平洋造山帯地域に属し, 急峻な地形と脆弱な地質を呈する. そのため, 梅雨前線の停滞や台風等の豪雨を原因に水, 土砂に関連する災害が数多く認められてきた. この被災履歴を踏まえて, 安全な社会活動を構築させるための治水, 治山の整備が進められている. しかしながら, 気候変動により見積もられる豪雨の量と頻度の増加は, 既往対策設計基準や避難体制をも凌駕する水, 土砂災害の発生を示唆している. 特に, 土砂に関わる災害に関するれば, 現状の対策整備率を約20%³⁾とし河川堤防対策整備率約55%⁴⁾よりも低いこと, 河川平成20年防災白書⁵⁾でも「近年の林地や傾斜地又はその周辺における都市化の進展など土地の変化と相まって, 土砂災害による犠牲者は, 自然災害による犠牲者の中で大きな割合を占めている」と報告されていること等より現状でも数多い課題が蓄積されている. また, 流域内の土砂の被害に着目すると「貯水池の堆砂増加による有効貯水量

の低下」, 「河道閉塞」, 「河床上昇に伴う洪水リスクの増加」, 「河床変形に伴う生態環境の変化」等の土砂量増加に伴う河川環境急変による影響が危惧される. そのため, 気候変動にも適応できる効果的な土砂対策整備と土砂管理体制の実現が望まれる. この実現には, 気候変動に応じた土砂生産量を時空間的に捉え, 生産の増加する時期と規模を見積もることが必要になる. また, 気候変動という全球規模に生ずる現象を取り扱う場合, 日本列島という広範領域を地域毎に比較することで対策の優先地域を求めるアプローチも社会効用の大きいものとなる. これに対し, 岡野ら⁶⁾, 長谷川ら⁷⁾は, 数値地理情報とダム堆砂量実績データを用いて日本列島全域の土砂生産量を解析している. しかしながら, 地形地質のみに依存した解析であり, 気候変動に対応する, ならびに土砂生産を誘発する降水, および水文量を考慮した研究課題と異なる. 大橋ら⁸⁾は, 流域の面積高度を利用して降水の流出に伴う土砂流出ポテンシャルパワーを見積もり, 日本列島の土砂流出量を求めた. しかしながら, 気候変動の影響までを言及していない. 一方, 秋本ら⁹⁾は, 川越ら¹⁰⁾の水文量を利用できる斜面崩壊発生確率モデルとダム堆砂量実績データを利用して土砂生産量予測モデルを開発し, 水文量に数値気候モデルの降水量出力結果を

利用することで、気候変動に応じた土砂生産量を見積もった。しかしながら、この研究に利用した数値気候モデル、ならびにSRES(Special report on emissions scenarios)排出量シナリオは、MIROC3.2-hiresのSRES-A1B(化石・非化石燃料バランスによる経済・国際重視の高成長型社会)、MRI-RCM Ver.2でSRES-A2(経済・地域重視の多元社会)であり、特定の数値気候モデル、そして温室効果ガス排出量シナリオを対象にしたものである。現況だけでなく、不確実性を含む将来の社会発展に依存する温室効果ガス排出量を考慮した場合、解像度、ならびに数値的に精度の高い特定のモデルを対象に影響を捉えるだけでなく、異なる数値気候モデル、SRES排出量シナリオを比較することで「影響の幅」を見積もる研究のアプローチも必要である。

本研究では、複数の数値気候モデル、ならびにSRES排出量シナリオを斜面崩壊発生モデル、土砂生産量予測モデルに利用することで、気候変動に対する斜面崩壊に起因する日本列島の土砂生産量の推計を試みた。数値気候モデルに基づく土砂生産の影響幅を求め、土砂生産量ポテンシャルを見積もり、気候変動に対する土砂対策整備、ならびに管理体制の提案に利用することのできる情報を作成した。対象期間として、中間気候(2050年対応時；2046年から2065年の平年値)、将来気候(2100年対応時；2081年から2100年)を検討した。

2. 解析方法

気候変動に対する斜面崩壊に起因する日本列島の土砂生産量を見積もるため、数値気候モデルの日降水量出力結果と、地形、地質の数値地理情報を秋本らにより開発された土砂生産量予測モデルに利用して斜面崩壊による流域毎の土砂生産量ポテンシャルを推計した。本研究において対象にした流域は、日本列島各地に存在する流域面積2,000km²以上、もしくは大都市に接する39個の一級河川である。以下に斜面崩壊発生確率モデル、土砂生産量予測モデルについて説明する。

2.1 斜面崩壊発生確率モデル¹⁰⁾

斜面崩壊の素因・誘因となる地形、地質そして水文学の条件の下に現象が生起する発生確率を求めるため、多重ロジスティック回帰分析を利用して斜面崩壊発生確率モデルを開発した。多重ロジスティック回帰分析は、統計理論による二項分布の確率モデルである。災害実績エリアの斜面崩壊現象について「発生」を「1」、「非発生」を「0」の二項分布に設定し、この「1」と「0」の関係をロジスティック曲線で連結させる。ロジスティック曲線を起伏量(地形条件)、動水勾配(水文学)を説明とした多重回帰分析で定式化することにより斜面崩壊発生確率モデルが構築された。モデルは、崩積土、古第三系

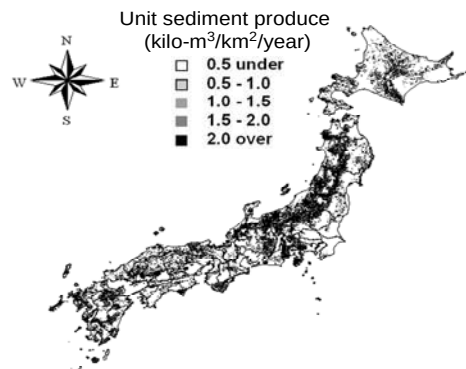


図-1 現在気候の再現期間5年の土砂生産量分布

堆積岩、新第三系堆積岩、花崗岩の4つの地質毎に構築されている。以下の式(1)に斜面崩壊発生確率モデル式を示す。

$$P = \frac{1}{1 + \exp[-(\sigma_0 + \sigma_h Y_h + \sigma_r Y_r)]} \quad (1)$$

ここで、 P :斜面崩壊発生確率、 σ_0 :切片、 σ_h :動水勾配係数、 Y_h :動水勾配、 σ_r :起伏量係数、 Y_r :起伏量(m)である。説明変数は有意確率5%以内であり有意水準95%を満たしている。

なお、動水勾配はRichardsの二次元浸透解析により求められるデータである。数値地理情報による斜面傾斜度、表層土壌を基に擬似的な二次元斜面を設定し、条件に応じた日降雨量データを与えることにより動水勾配が求められる。降雨量条件に数値気候モデルの日降雨量出力結果を入力することで、気候変動に応じた動水勾配、ならびに斜面崩壊発生確率を解析することができる。したがって、動水勾配は、斜面崩壊発生確率を求めるための動的なデータとして位置づけられる。

2.2 土砂生産量予測モデル⁹⁾

土砂生産量予測モデルは、日本列島各地に分布する59箇所のダム貯水池内堆砂実績データと現在気候によるダム上流域の再現期間5年の平均発生確率を比較検証したことで求められたモデル式である。ダム貯水池の年平均比堆砂量(m³/km²/year)と平均斜面崩壊発生確率は、指数関数により決定係数 R^2 0.65の強い関係を示しており、この式を利用することで発生確率から比土砂生産量を推計するモデルを開発した。以下の式(2)に土砂生産量予測モデル式を示す。

$$SY = 0.1051 \exp(0.0301P) \quad (2)$$

ここで、 SY :比土砂生産量(m³/km²/year)、 P :発生確率である。なお、堆砂量に関し、ダム貯水ごとに設けられた土砂制御対策や融雪に起因する斜面崩壊の影響を考慮すること、発生確率において、植生による斜面安定化効果の影響を考慮すること等のモデル式を更に改良する要素が残されている。土砂生産量のポテンシャルを推計することは可能であるものの、改良要素も踏まえたモデル

にすることで今後の一層の実務面での貢献が期待できる。
図-1に現在気候(1970年から2000年)の再現期間5年の日降雨量極値による土砂生産量分布を示す。

3. データセット

解析に利用したデータは空間解像度 $1\text{km} \times 1\text{km}$ の数値地理情報と気候変動の影響を考慮するための数値気候モデルの降水量出力結果である。以下に各データの詳細を説明する。

3.1 数値地理情報

斜面崩壊発生確率モデルの入力データに数値地理情報を利用している。各データについて説明する。

(1) 地質・地形データ

地質データとして国土数値情報KS-META-G05-54Mを利用し、崩積土、古第三系堆積岩、新第三系堆積岩、花崗岩を抽出した。地形データである起伏量は、国土数値情報KS-META-G05-56Mに格納される最高標高、最低標高の高度差から求めた。

(2) 水文量解析に利用したデータ

水文量として利用した動水勾配は、浸透解析の浸潤線より求められた解析データである。この浸透解析において擬似的二次元斜面に利用した表層土壌データは国土数値情報KS-META-G05-54M、斜面傾斜度データは国土数値情報KS-META-G05-56Mより取得した。

(3) 流域抽出データ

本解析では、気候変動に伴う日本列島の土砂生産量を流域毎に集計している。流域は、国土数値情報のKS-META-W07-52Mの河川コードより分類した。

3.2 数値気候モデル

動水勾配を求めるための浸透解析に利用する降水量として数値気候モデルの出力結果を利用した。本研究では、異なる数値気候モデル、SRES排出量シナリオを比較することで「影響の幅」を求めるアプローチによる取り組みを行っている。複数の数値気候モデル、SRESを利用することで土砂生産量を推計した。

解析に利用した数値気候モデルとして、MIROC3.2-Medres(以下 MIROC, 開発: 東京大学気候システム研究センター・国立環境研究所・海洋開発気候研究センター)、MRI-CGCM2.3.2(以下 CGCM, 開発: 気象庁気象研究所)、Parallel Climate Model(以下 PCM, 開発: National Centre for Atmospheric Research)を利用した。これらは、空間解像度 $280\text{km} \times 280\text{km}$ 、環境重視と経済重視、地域化とグローバル化の社会発展を想定したマルチの温室効果ガス排出シナリオに対応できる数値気候モデルである。また、各数値気候モデルのSRES-A1B(化石・非化石燃料バランス重視の高成長社会)、SRES-A2(多元

社会)、SRES-B1(持続発展型社会)の3つの社会シナリオを解析に利用している。

4. 日降雨量極値へのダウンスケーリング

解析に利用する気候モデルの出力結果は、空間解像度を $280\text{km} \times 280\text{km}$ としており、巨視的スケールの気象、もしくは降水現象を対象にしたものである。日本列島を対象にする場合、四方が海洋に囲まれ、急峻な山岳列島を形成する国土条件に起因した地域に依存する降雨現象が認められている。そのため、数値気候モデルの出力結果をそのまま利用するのではなく、地域に応じた降水量の再現に取り組む必要がある。経験的に把握されている地域的な降水量分布を利用して数値気候モデルの降水量出力結果を空間解像度 $1\text{km} \times 1\text{km}$ の日降雨量極値データにダウンスケーリングすることとした。

4.1 月降雨量のダウンスケーリング

経験的に把握されている地域的な降水量分布としてメッシュ気候値2000(監修: 気象庁)のデータを基に3次メッシュにダウンスケーリングした¹¹⁾。メッシュ気候値2000では、空間解像度 $1\text{km} \times 1\text{km}$ の平年値月降水量(統計期間: 1971年から2000年)を格納したデータベースである。データベースは、気象台、AMeDASの観測値を基に、観測所の空白域を標高、地形開放度、風向等を考慮した重回帰式で補間することにより作成されている¹²⁾。

国土数値情報の都道府県コードを利用し、3次メッシュデータを都道府県別に平均値で集計した。数値気候モデルの気候値を都道府県別に集計するまでの過程を以下の(a)から(c)に示す。

- (a) 数値気候モデルの解像度に平均化したメッシュ気候値2000の気候値と数値気候モデルの1971年から2000年の月気候値の比(モデル補正係数 Bm_j)を求める。
- (b) 数値気候モデルの解像度に平均化したメッシュ気候値2000の月気候値とこのメッシュ内のメッシュ気候値2000の月気候値の比(細解像度変換係数 Bd_{ij})を月毎、および3次メッシュ毎に求める。
- (c) モデル補正係数 Bm_j 、細解像度変換係数 Bd_{ij} を数値気候モデルの月降水量値 m_j に乗じて3次メッシュ毎の月降水量値 R_{ij} を求める。以下の式(3)に変換式を示す。

$$R_{ij} = m_j \cdot Bm_j \cdot Bd_{ij} \quad (3)$$

4.2 月降雨量から日降雨量極値

解析に利用するデータは日降雨量極値であり、空間解像度 $1\text{km} \times 1\text{km}$ の月降雨量を日降雨極値に変換する必要がある。そこで、川越らの開発した実績データに基づく

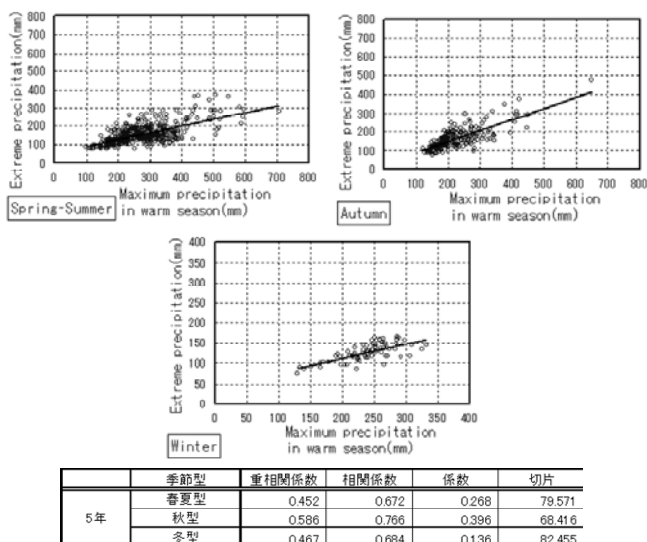


図-2 再現期間5年日降雨量極値と暖候期間中最大月降雨量の関係

気候区毎の降雨極値変換式¹³⁾を利用し、現在気候、中間気候、将来気候に応じた日降雨量極値データを作成した。この変換式は牛山らの暖候期(4月から11月)と日降雨量極値の統計的に有意な線形関係のアルゴリズム¹⁴⁾を基に開発したものであり、線形式との誤差を最小限にとどめるための条件に置き換えたものとしている。なお、土砂生産量予測モデルにあわせて本研究では再現期間5年の日降雨量極値を求めるためのモデルとしている。降雨極値変換式は、気象台ならびにAMeDAS観測所毎の日雨量データを頻度解析(確率分布:Generalized Extreme Value分布, 母数推定法:Probability Weight Moment法)から再現期間5年の日降雨量極値に変換したデータと暖候期間中の最大月降雨量データから求められたものである(図-2 参照)。気候区毎に応じて降雨極値式は異なるが、気候区は、最大月降雨量の該当する季節により分類した。3月から5月を春型、6月から8月を夏型、9月から11月を秋型、12月、1月、2月を冬型とする。ただし、現在、そして数値気候モデルによる将来の推計から春型に該当する地域は、薩南諸島のみ、夏型と概ね同じ降水量であることから春型と夏型を統合することとした。以下の式(4)に降雨極値変換式を示す。

$$Ru_{ij} = a \cdot Rmax_{ij} + b \quad (3)$$

ここで、 Ru_{ij} ：再現期間5年の日降雨量極値(mm/day)、 $Rmax_{ij}$ ：月降水量 R_{ij} のうち暖候期(4月から11月)中の最大値(mm/month)、 a ：降雨極値変換係数、 b ：降雨極値切片である。各気候区の係数は図-2に示すとおりである。

日降水量極値分布結果の例としてMIROCより求められた2050年時の再現期間5年の日降雨量極値分布を示す。また、現在気候と各数値気候モデル、各SRESの日本列島平均の日降雨量極値を図-3に示す。

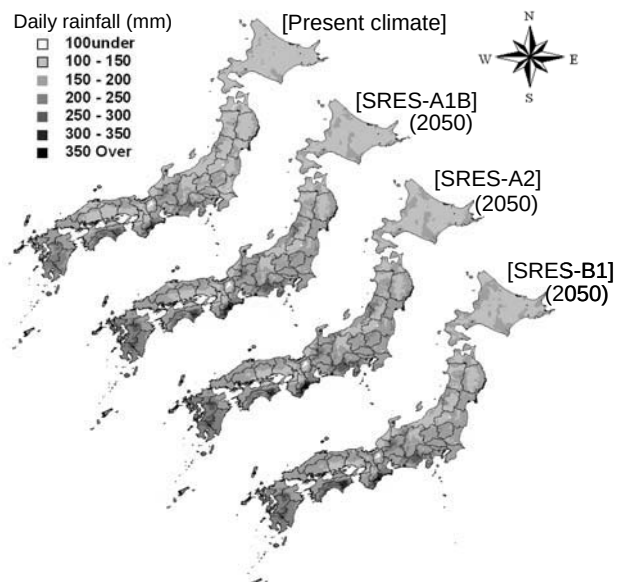


図-3 MIROCによる中間気候時再現期間5年の降雨極値分布

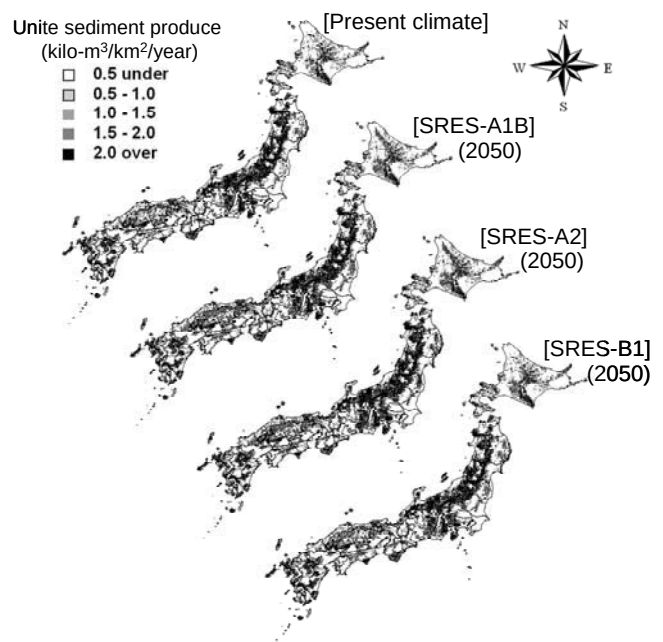
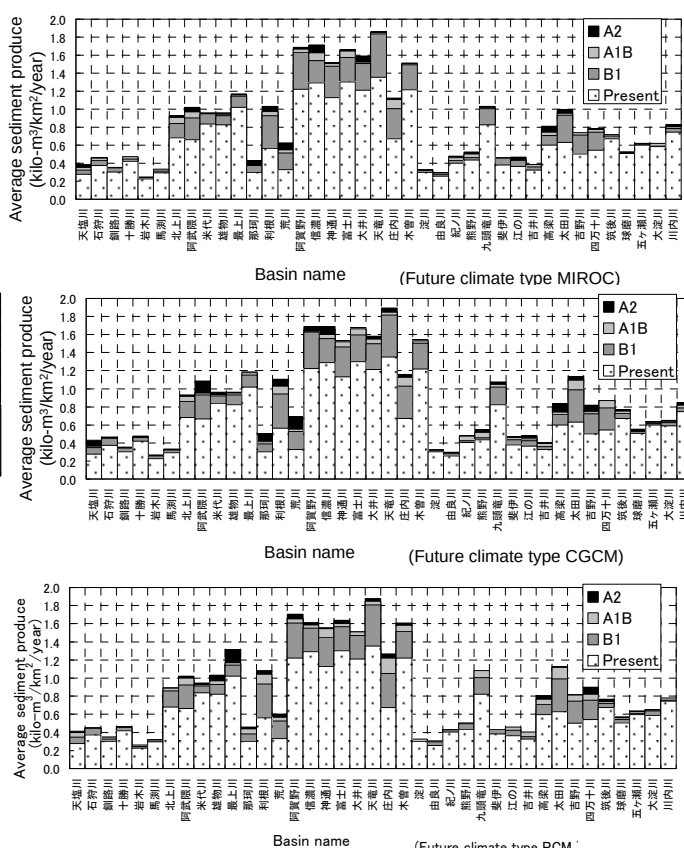
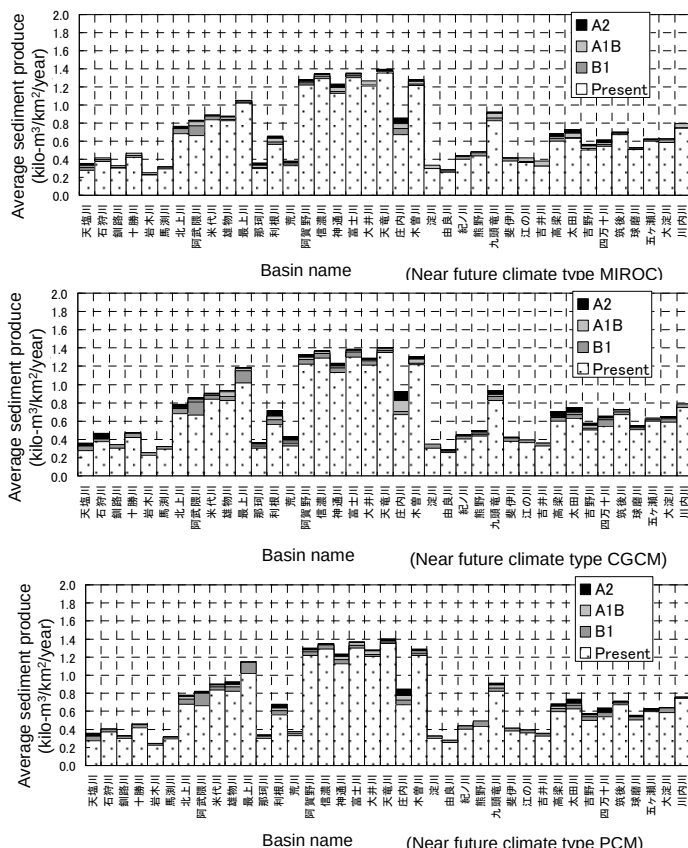


図-4 MIROCによる中間気候時再現期間5年の土砂生産量分布

5. 解析結果

数値気候モデル、数値地理情報を土砂崩壊予測モデルに利用することで、気候変動に応じた土砂生産量予測マップを作成することができる。その結果の一例として、図-4にMIROCの各SRESに対する中間気候時の土砂生産量マップを示す。本解析では、この結果に示される土砂生産量を数値地理情報の流域コード別に集計することで、流域に応じた土砂生産のポテンシャルを見積もっている。流域別の土砂生産量予測の結果として、図-5に数値気候モデル別の中間気候時、図-6に数値気候モデル別の将来気候時における土砂生産量結果を示す。

図-5より、各数値気候モデル共通して土砂生産量の著しい地域の特徴が認められ、相対的に日本列島の中央か



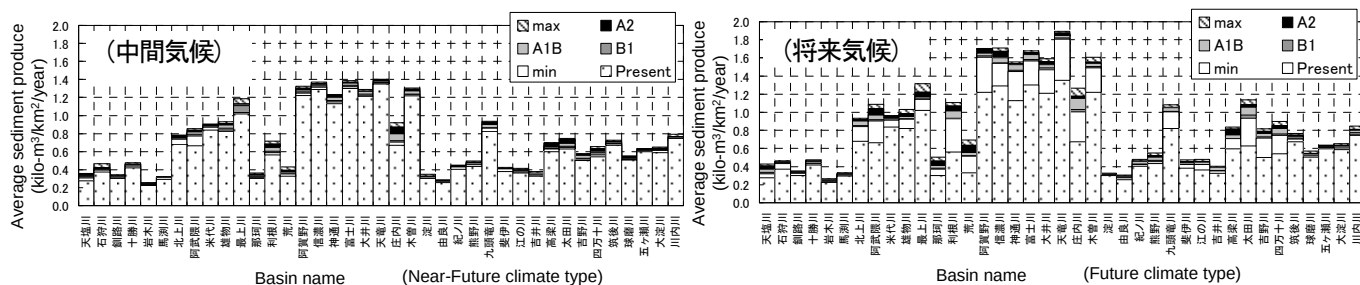
ら北部の土砂生産量の著しい増加が見込まれる。特に顕著な地域として挙げられるものが、東北地方太平洋側から南部、そして、日本アルプスを水源にする北陸地方、東海地方である。北陸地方、東海地方の流域は、現在でも比土砂生産量 $1.2\text{kilo-m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ と多いにも関わらず、短い時間変化で更に土砂生産量の増加が推計されることから、土砂対策を優先して行うべき地域になりうる。また、CGCMの結果のみを参考にとすると、関東地方の流域の土砂生産量の増加が見込まれる。社会基盤が集中する地勢からも土砂生産の要注意箇所になると同時に、この地域のメソスケールの気象も理解し、細かな精度の解析を行い再検証する必要がある。SRESの傾向を検証すると、土砂生産の多い序列は、いずれの数値気候モデル共にSRES-A2, SRES-A1B, SRES-B1の傾向を示す。この結果は、IPCC 第4次評価報告書¹⁾の気温上昇の序列と一致するが、一部ではSRES-A1B, SRES-A2が入れ替わる流域も認められ、この入れ替わった流域の地域的共通性はなく疎らである。この結果は、中間気候時で温室効果ガス排出量の影響がSRES-A1B, SRES-A2で明瞭でないことを示唆している。なお、気温上昇と土砂生産量増加する関係の一致は、気温上昇により水循環が活発化することに伴う短期的な降雨量(日降雨量)の影響と解釈される。

図-6より、中間気候から将来気候に移行により、日本列島各流域の土砂生産量が急激に増加することが見て取れる。空間的な土砂生産量増加の傾向は、中間気候と同様であり、相対的に日本列島の中央から北部の土砂生産の著しい増加が見込まれる。特に、中間気候ではCGCM

のみで土砂生産量増加の推計された関東地方の土砂生産量ポテンシャルの増大が示され、利根川は現在気候比で各シナリオを包括して約1.5倍となる見込みである。SRESの傾向を検証すると、土砂生産の多い序列は、いずれの数値気候モデル共にSRES-A2, SRES-A1B, SRES-B1である。将来気候時には、温室効果ガス排出量の影響がSRES-A1B, SRES-A2で明瞭になることが明らかにされている。

6. 考察

各数値気候モデル、およびSRESの結果を5章に示したが、これらを包括的に捉え気候変動による土砂生産量の影響をSRES排出量シナリオに応じて評価した結果が図7である。図7には、各SRESの平均値と、各数値気候モデル、およびSRESの最大値、最小値を示している。そのため、この結果から土砂生産量の影響の幅を理解することができる。これらの結果から、東北地方、関東地方、北陸・東海地方、中国・四国地方における流域の著しい土砂生産量増加が理解することができ、日本列島中部から北部の土砂生産量増加の傾向が見てとれる。特に、現状でも土砂生産量の多い北陸地方、東海地方は、既往対策設計基準を超過する土砂生産活発化が生じる危険性もあるため、土砂対策、気候変動に対する詳細な検討に留意しなければならない。また、中間気候から将来気候に移行することで日本列島各流域の土砂生産量が急激に増



加することも明らかにされている。二酸化炭素等の温室効果ガス排出量は大気に長期的に停滞する特徴を有する。この特徴、長期的な土砂生産量ポテンシャルの増加を考慮した場合、例えば現在、温室効果ガス濃度を安定化に示される温暖化緩和策を講じると、2100年時の土砂生産の抑制に効果が発揮される可能性も示唆される。ただし、この影響がどの程度の軽減に繋がるかは不明であり、今後は、数値気候モデルの気温の多岐にわたる気象因子も踏まえた解析に発展させる必要がある。

数値気候モデル「MIROC」,「CGCM」,「PCM」を利用し, SRES排出量シナリオに応じた斜面崩壊に起因する日本列島の土砂生産量の推計に取り組み, 数値気候モデルに基づく流域毎の土砂生産量ポテンシャルを求めた. 以下に本研究の結果を列挙する.

謝辞：本研究は、環境省地球環境研究総合推進費戦略研究(S-8)：「温暖化影響評価・適応政策に関する総合的研究」から援助を受けました。また、データ整備において、みずほ情報総合研究所様の支援を頂きました。ここに記して謝意を示します。

- 1) 例えば S. EMORI and S.J. BROWN : Dynamic and

(2010. 4. 8受付)