

41. 長良川における流域特性の変化と微細土粒子生産との関係

THE RELATION OF A BASIN CHARACTERISTIC AND MICROSCOPIC SOIL PARTICLE DISSOLUTION IN NAGARA RIVER BASIN

守利悟朗*・篠田成郎*

Goro MOURI, Seirou SHINODA

ABSTRACT; In order to clarify the correlation of a climate change and a forest surface change of state, data analysis was conducted concerning the secular fluctuation tendency of temperature and rainfall runoff and SS. And the model applicable in a forest basin was built and the microscopic soil particle quantity of production from forest ground was predicted based on the global warming scenario.

Due to a pronounced increase in the number of days exceeding 25°C in the forest region, the quantity of soil moisture evaporation is increasing. As a result, the amount of soil moisture in the forest ground surface layer is decreasing. As soil moisture in the forest soil surface decreases, the soil's ability to resist the collapse of its aggregated structure decreases. Consequently, even small and medium-scale precipitation events can easily cause soil dissolving. When microscopic soil particles dissolve in large quantities, soil porosity increases, and the decrease in soil moisture and increase in subsurface flow rate combine to accelerate dissolving of microscopic soil particles, thus creating a vicious circle. Finally, changes in forest soil due to global warming can have a marked effect on forest ecosystems.

KEYWORDS; global warming; minute particles; colloid; silt; ground dryness; global environment change

1. はじめに

近年、流域環境学の分野では降雨流出特性の変化等の問題が顕在化している。都市、山地、耕地などが混在する流域環境を評価する場合、土地利用状態、動植物活動状態および水文・水質状態などを総合的に評価しなければならない。それらの中でも、評価の基礎となる水循環特性を理解することは重要である。降雨流出特性の変化の原因は、しばしば豪雨の局地化などに代表されるような水文特性の変化や都市開発や樹木伐採などに代表される地表面状態の改変に基づくものとして捉えられてきた。そして最近では、気候変動と流出特性の関係について多くの研究がなされており一定の成果を上げている¹⁾。一方、評価の対象を森林流域に限定した場合でも同様に降雨流出特性の変化等の問題が顕在化している²⁾。そこで本研究では、森林流域における気候変動と微細土粒子生産特性の変化および流出特性の変化の関係を明らかにした。

2. 長良川の水文特性と微細土粒子生産の関係

森林流域における流出特性を規定する変動要因として森林土壌を構成している団粒構造について考えた。通常、森林土壌の成分は礫のような大きな粒子(直径 1.0mm 程度)からシルトやコロイドのような超微細粒子(直径 0.1 μ m 程度)までで構成されている。特に、森林土壌の団粒構造を形成している成分の内、コロイドや

*岐阜大学 総合情報メディアセンター Information and Multimedia Center, Gifu University

シルトといった超微細土粒子は、森林の水分涵養機能の重要な素質となっている。したがって、森林土壌中の団粒構造が壊れ、超微細土粒子成分が大量に流出すれば、森林の水分涵養機能は減少し、透水性が増加するので流出特性が変化すると考えられる。団粒構造は土壌が乾燥することで強度が低下する。したがって、ここでは、まず、森林流域における気候変動と微細粒子供給量の関係について過去 25 年程度の観測データを基に示した。

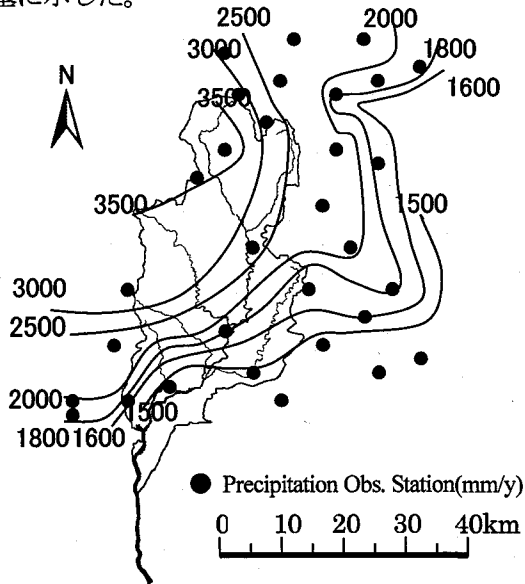


図-1 年間総降水量の分布

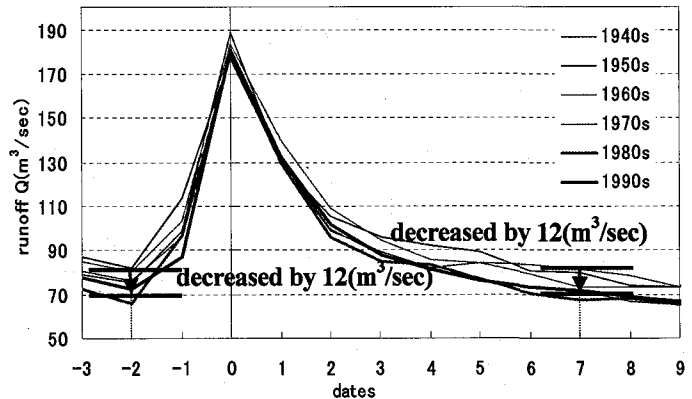


図-2 年代別の洪水時におけるハイドログラフ

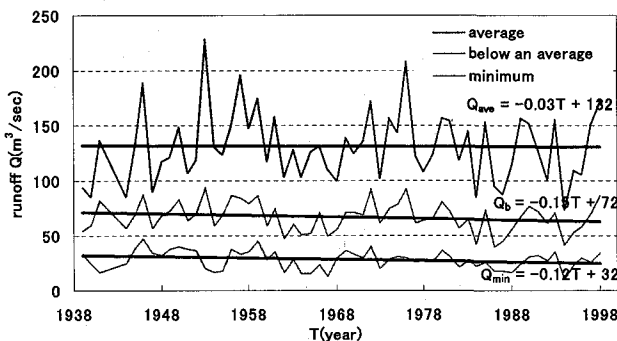


図-3 流量の長期変化(1)

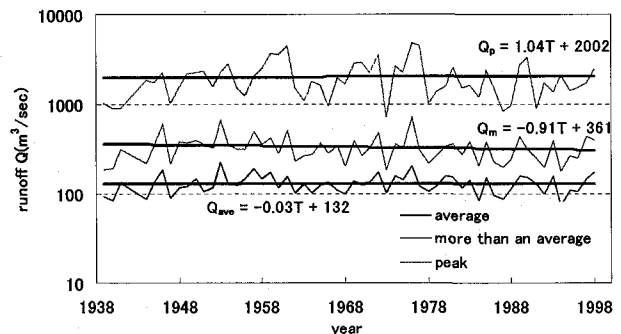


図-4 流量の長期変化(2)

図-1 は、長良川流域の年間総降水量の分布を示している。平野部では降水量は少なく山地部ではかなり多くなっている。また、過去 25 年間程度の期間において年間総降水量に大きな変動はないものの、無降雨期間の長期化など、降雨特性の変化が明らかになっている 2)。降雨特性の変化は流出特性の変化に大きく影響を与えるが、ここでは、気候変動による森林状態の変化と流出特性の変化および微細土粒子生産の関係を明らかにする事に焦点を絞り、水文特性の変化と河川水中の SS(Suspended Solids)に関する解析をおこなった。

まず図-2 は、過去 50 年間における洪水時のハイドログラフを年代別に示したものである。降雨特性の影響を減らす為、最大流量発生日の 2 日前から 7 日後の間で降雨イベントが 1 回の場合を対象とした。その結果、ピーク流量は大きく変化していないものの、洪水前後の流量が減少傾向であり、降雨流出時間の減少、および洪水の収束時間の減少傾向が示された。図-3 は、流量曲線を基にした平均流量、平均以下の流量およ

び最低流量の長期変化を示している。この図から特に平均以下の流量の減少傾向が顕著であり、基底流量が減少傾向であることが示唆された。図-4は図-3と同様、流量曲線を基にした平均流量、平均以上の流量および最高流量の長期変化を示している。この図からは最高流量の大きな変化傾向は見られなかった。

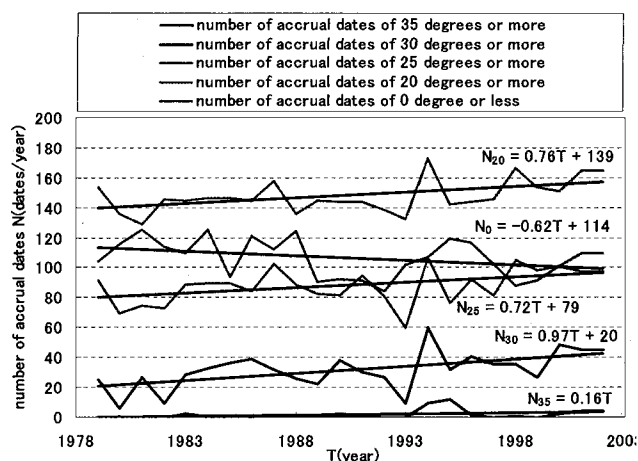


図-5 気温の長期変化

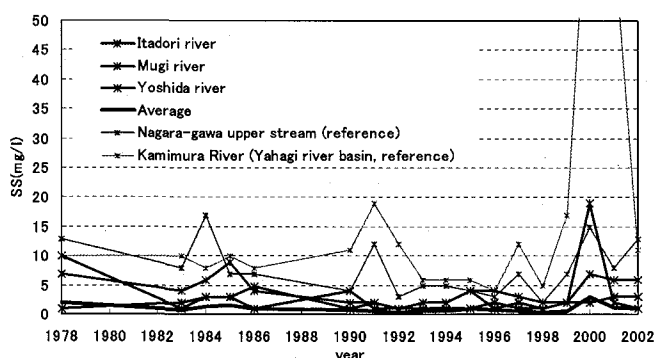


図-6 SSの長期変化

気温の長期変化特性としては、これまでに平野部と比較して森林部での上昇傾向が強いことが明らかになっている²⁾。ここでは、森林状態の変化に関わる気温の変化特性として、1年間あたりの20℃以上の発生日数の長期変化傾向を調べてみた。その結果、夏季での気温上昇が著しく、特に30℃以上の発生日数は過去25年間で20日も増加していた。結局、このことにより無降雨期間の長期化と夏季の気温上昇により、森林表層土壌は乾燥化傾向であることが示唆された。また、流出特性の変化については、降雨流出時間の減少、洪水の収束時間の減少および基底流量が減少傾向であることが示唆された。つまり、気温上昇による森林土壌の乾燥化により透水性が変化することが示された。森林土壌における透水性の変化は、土壌を構成している土粒子の質の変化であるので、水分涵養機能の構成要素である団粒構造の崩壊が進んでいることが考えられる。図-6はSSの長期変化を示している。浮遊物質の濃度は長期間にわたりほぼ一定であるが、河川流量が減少傾向であることを考慮すれば、微細土粒子の生産ポテンシャルは増加していると考えられる。

3. 気温上昇と森林土壌乾燥化及び微細土粒子融解の概念

森林土壌の主要な構成要素である団粒構造のうち微細土粒子は水分による粒子間結合力の影響が大きく、水分を失った微細土粒子は団粒構造としての強度を著しく失うことが考えられる。団粒構造が維持されていれば、微細土粒子は大きな粒子成分により幾何学的に覆われる遮蔽効果により、たとえ微細土粒子が融解したとしても直ちに土壌表面もしくは河道に流出することはない。しかしながら、気温上昇の影響を受けた森林土壌が乾燥化し団粒構造が強度を一旦失うと、降雨イベント等の水分供給により団粒構造が壊れやすくなるので、融解した超微細粒子成分は、大きな粒子成分の遮蔽効果を受けずに森林斜面を水分移動とともに流下すると考えられる。つまり、図-7に示す通り、気温上昇の効果により蒸発量が増加した結果、土壌水分が失われた場合、団粒の強度が低下し微細土砂が融解しやすくなるので、その結果、土壌の有効空隙率が増加し、さらに土壌水分量が減少するという悪循環が形成されることが考えられる。このように気温上昇に起因する蒸発量の増加による微細土粒子の融解(崩壊)量の増加は森林状態の悪化、惹いては森林植物を含めた生態系

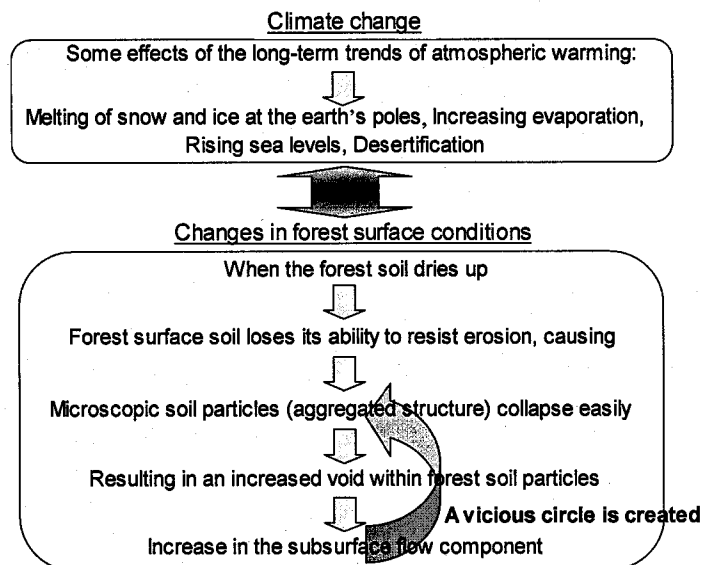


図-7 気温上昇による森林土壌乾燥化と微細土粒子融解の概念

の変化といった大きな問題を生じさせることも考えられる。

4. 森林土壌からの微細土粒子融解過程のモデル化

微細土粒子の融解現象は、土壌水分と分子間結合力の関係及び堆積による加圧の影響としての真の粘着力によって表すことが出来る。本研究では、森林土壌A層或いはB層内での超微細土粒子融解過程を粒子間応力と土粒子の堆積の効果による真の粘着力の関係をを用いることによりモデル化した。そして、著者らによる流域規模での水分・土砂動態モデル³⁾⁴⁾と結合し、森林流域で適用可能な総合的な水分・土砂動態モデルを構築するとともに、地球温暖化による森林土壌乾燥化と微細土砂融解過程の関係を明らかにし、地球温暖化シナリオに基づく将来予測をおこなった⁵⁾。

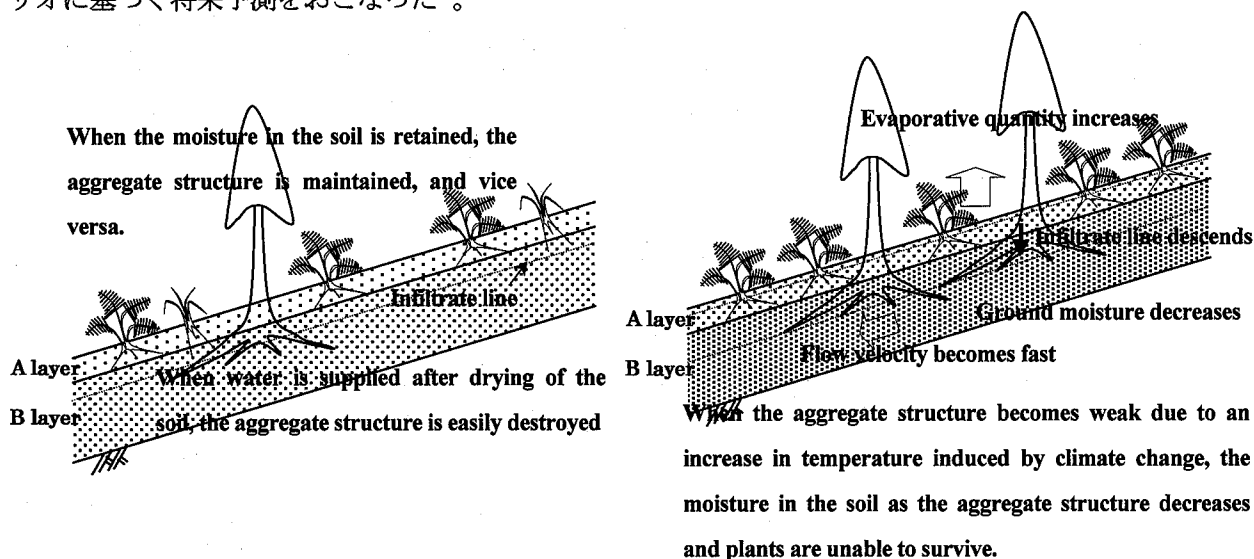


図-8 森林土壌融解過程の概念

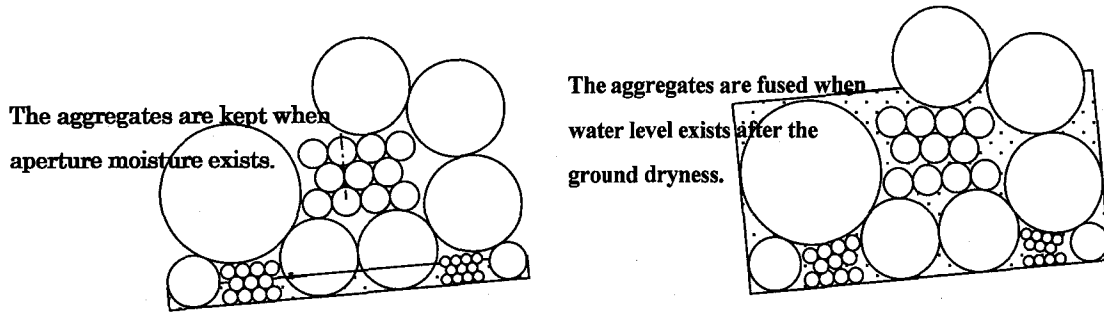


図-9 団粒構造崩壊の概念

5. 森林土壌からの超微細土粒子融解条件の定式化

超微細土砂の融解現象を土壌水分と分子間結合力の関係及び堆積による加圧の影響としての真の粘着力によって表す。微細土砂粒子間には、表面張力による粒子間結合力が作用している。微細土粒子に作用する表面張力は大気圧で表される。

$$2T_s = 2u_a \left\{ \left(r + \frac{L}{2} \right) \cdot \cos \theta - r \right\} \quad (1)$$

ここで、 u_a :大気圧、 r :土粒子の接触部分のメニスカスから決まる長さ($r=d$)、 θ :土粒子の接触部分のメニスカスから決まる角度($\theta=30^\circ$)、 L :土粒子の直径である。また土粒子の接点力 F は水圧の合計で表される。

$$F = 2u_w \left\{ \left(r + \frac{L}{2} \right) \cdot \cos \theta - r \right\} \quad (2)$$

ここで、 u_w :水圧である。したがって、粒子間結合力は、堆積の影響による真の粘着力(固結力に相当)も考慮して以下のように表す。

$$\sigma' = c + 2(u_a - u_w) \left\{ \left(r + L/2 \right) \cdot \cos \theta - r \right\} + 2T_s \quad (3)$$

したがって、微細土粒子の融解条件を粒子結合力とせん断力の関係を用いて以下のように定義する。

$$Ft = \frac{\sigma'}{\tau} \leq 1 \quad (4)$$

森林斜面からの超微細土粒子の移動条件 Ft を、粒子間結合力 σ' と土粒子のせん断力 τ の関係で記述すると、

$$\begin{aligned} Ft = \frac{\sigma'}{\tau} &= \frac{\alpha [c + 2(u_a - u_w) \{ (r + L/2) \cdot \cos \theta - r \} + 2T_s]}{[\gamma_{sat} \cdot h' + \gamma_t \cdot (D - h')] \cdot \sin \theta \cos \theta} \\ &= \frac{2\sqrt{2} \cdot T_s / d}{\{ \gamma_{sat} \cdot h' + \gamma_t \cdot (D - h') \} \cdot \sin \theta \cos \theta} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 γ_t :土の湿潤単位体積重量、 h' :土壌内の地下水位高さ、 d :見かけの土壌厚($=\gamma D$ 、 γ は有効空隙率、 D は土壌厚)である。

6. 長良川流域への適用

本研究で構築したモデルを長良川流域へ適用した。図-10は、表層における微細土粒子融解の計算結果を空間分布図として示したものである。同時に図-1で示した年間降水量の分布形状と見比べてみると良く一致し

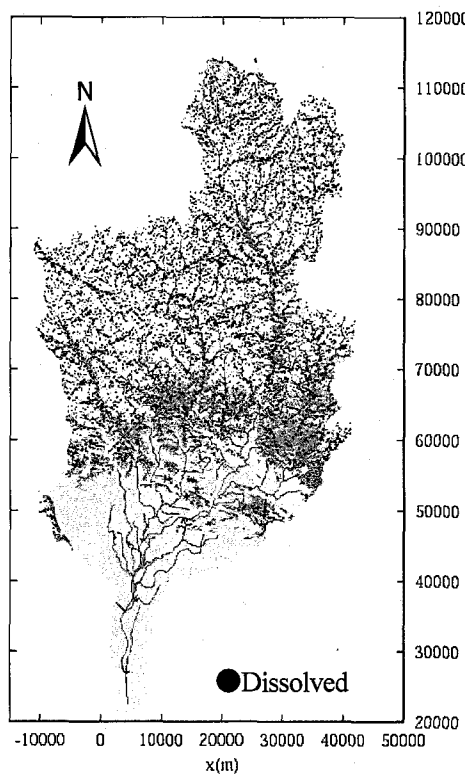


図-10 微細土粒子融解の分布

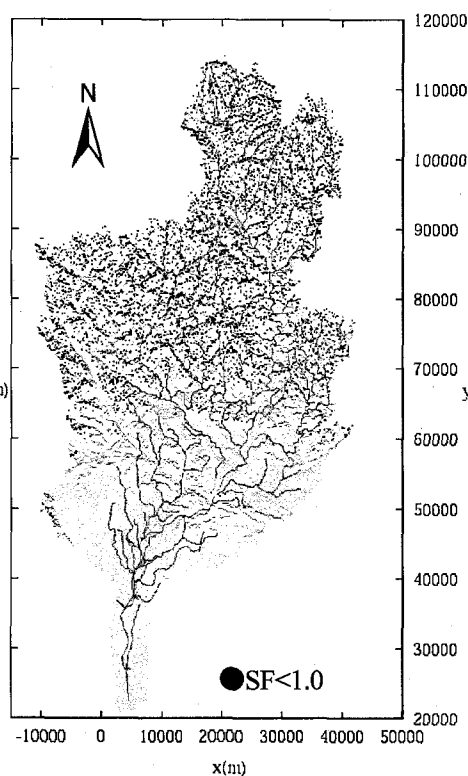


図-11 斜面安全率の分布

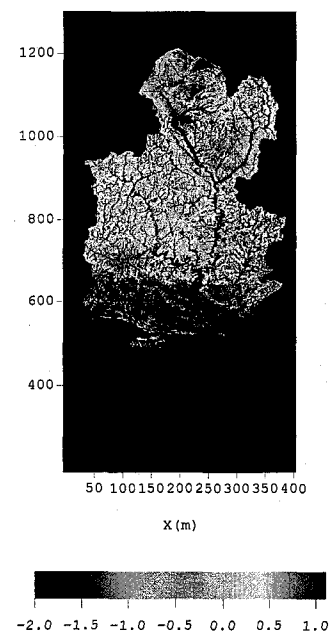


図-12 斜面勾配の分布

た。図-11は、斜面安全率の計算結果を空間分布図として示したものである。こちらは図-12で示した斜面勾配の分布と比較してみると一致した傾向を示した。図-13は、地球温暖化シナリオとして気温が5℃上昇した場合の微細土粒子融解量と水分量の関係を表層土壌と下層土壌に区別して示した。微細土粒子の融解量は1000(m³/sec)規模の出水に対して、表層土壌では27%程度の増加が予測された。細線は気温の変化がない場合での微細土粒子融解量と水分量の関係である。

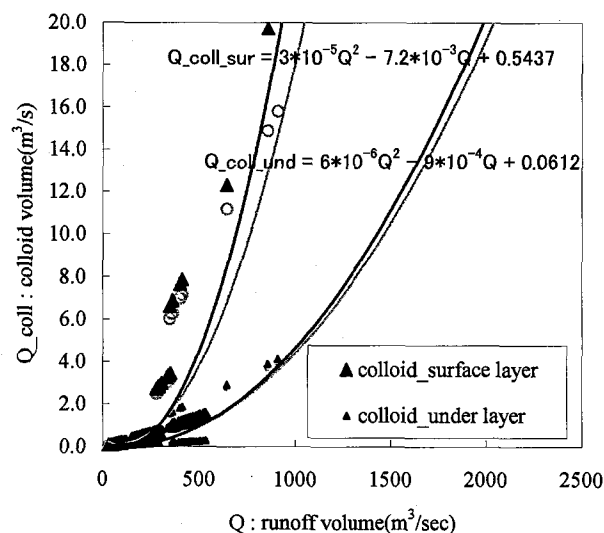


図-13 地球温暖化シナリオに基づく微細土粒子融解量と水分量の関係

7. まとめ

本研究では、森林面積割合が75%を占める長良川流域を対象として、流域特性と微細土粒子生産の相互関係を明らかにした。得られた成果を以下にまとめる。

気温の長期変化傾向はすでに周知のとおり増加傾向となっている。特に長良川の森林集水域に限定した場合では1年間当りの30℃以上の発生日数増加が顕著であり、過去25年間で20日も増加した。30℃以上の発生日数の増加は、夏季における森林土壌の水分量を著しく減少させることを示唆している。また、降雨特性の変化としては、この50年間では年間総降雨量に大きな変化はないものの、豪雨の集中化無降雨期間の増加などが明らかになっており²⁾夏季の顕著な気温上昇と共に森林土壌を乾燥化する原因になると考えられる。また、流出特性に関しては、降雨流出時間の減少、洪水の収束時間の減少および基底流量が減少傾向が確認され、森林土壌の透水性が増加していることが示唆された。そして、SS濃度の長期変化傾向からは微細土粒子の生産ポテンシャルの上昇傾向が示唆された。つまり、限られた期間においては気温上昇傾向と微細土粒子生産量と水分流出特性の間に一定の相関があることが明らかになった。このことから、気候変動に伴う気温上昇による森林土壌乾燥化と微細土粒子の融解過程を、気温上昇による蒸発量(土壌からの水蒸気量)の増加過程、土壌水分の減少過程、微細土砂の融解(崩壊)過程として表した。そして、森林の水分涵養機能としての微細土粒子成分の流出に対する重要性を指摘し、森林流域で適用可能な総合的な水分・土砂動態モデルを構築した。長良川流域でのモデル解析の結果として、微細土粒子融解と斜面安全率の計算結果についての空間分布を示し、各々、降雨量分布と斜面勾配分布との関連性が確認された。また、河川流量と微細土粒子量の関係について2次関数で表すことが出来た。そして、現在と地球温暖化シナリオに基づく計算結果において微細土粒子融解量と水分流量の関係を比較検討した。

参考文献

- 1) IPCC(2001):気候変化2001科学的根拠-政策決定者向けの要約, 第一作業部会報告書, IPCC第三次評価報告書(気象庁訳)。
- 2) 篠田成郎・守利悟朗・和田裕典・亀原裕・山川淳平・片桐猛: 気候変動による森林流域の変化-長良川流域を対象として-, 第12回地球環境シンポジウム講演論文集, pp. 165-170, 2004.
- 3) 守利悟朗・椎葉充晴・堀智晴・市川温:流域規模での水・土砂動態のモデル化及び実流域への適用, 水工学論文第47巻, pp. 733-738, 2003.
- 4) Goro Mouri, Michiharu Shiiba, Tomoharu Hori and Yutaka Ichikawa : Modeling of water and sediment dynamics in the basin scale and its application to an actual basin, proceeding of the 6th international conference on hydroinformatics, Singapore, pp1791-1799, 2004.
- 5) 守利悟朗・篠田成郎:地球温暖化による森林土壌乾燥化及び超微細土粒子融解過程のモデル化, 水工学論文第49巻, pp1045-1050, 2005.