

論文内容の要旨

Integrated Assessment of Water Availability under Climatic Changes along
the Tone River and Tokyo Metropolitan Area
(利根川流域および首都圏を対象とした気候変動が水利用に与える影響の統合評価)

Islam Md. Sirajul

地球の気候が日々変化していることは広く知られるようになってきた事実である。今日の地球規模での人間活動による温室効果ガスの激増は、温室効果として知られる地球の気温上昇を引き起こしてきている。ここ 10 年(1991 年～2000 年)の地球の平均気温は、気温の測定記録のある 1800 年代半ば以来、最も高く、気温上昇効果による、自然や、人、または、社会経済などのさまざまなセクターに対する影響への懸念が強まっている。

こうした状況下で、水資源問題は最も不安定な要素として考えられている。温暖化が懸念されはじめた頃から、温暖化による水文学や水資源への影響は、自然や、社会、経済に多大なインパクトを与えうるということが広く認識されてきている。水循環のバランス、水需要や水質などの変化を含む将来の気候変化によって、一つの地域の水文学的システムはさまざまな影響を受けうる。ところが、その影響の性質や大きさは、一般化することが困難で、考慮されるパラメーターや、地域ごとの地形や水文学的な気候の性質が違うため、異なるセクターや地域では、その影響の性質や大きさが異なる。

本研究では、将来、気候が変化した時の、都市における利用可能水量の予測を研究対象としている。研究対象地域として東京都都市圏(TMA)を選んだ。ここでの東京都都市圏(TMA)の定義は、東京都のうち、東京都水道局によって配水がなされている地域のこととする。TMA は、供給水量のうち約 80%を利根川から取水しており、2,3 年に約 1 回の頻度で水不足に陥っている。都市周辺部での利用可能水量に影響を与えるいくつかの因子は、自然のシステムの変化による因子と人間活動の変化による因子に分けられる。TMA の利用可能水量に影響する因子を特定するための最初のステップとして、いくつかの水文学的な気候上のパラメーターの、歴史的変動の性質と相関関係を調べた。TMA での水管理のための重要な地点と考えられる利根川の栗橋地点が、調査地点として選択された。1961 年から 2000 年の間に、利根川流域では約 1.3℃の気温上昇が観測されており、これは全球平均の約 0.5℃の気温上昇よりもかなり高い。この期間における降雨量は増加傾向にあるものの、降雨の年変動が大きく、結果として TMA における利用可能水量は年ごとに大きく変動するようになってきている。また、渇水の年のほとんどで、温度が高く、降水量が少なかった。雨水の流出量と降水量との比、または、流域での河川への流出量も気候変動に敏感であることが観測された。他方で、この期間での流域における土地利用の変化はわずかであった。従って、観測された利根川の流れの変動は、気候変動にほとんど依存していると考えられることができる。ところが、観測された相互関係から、自然のシステムとは別に、農業用水や家庭用水などの気候に感受性のあるいくつかの人間活動もまた、栗橋地点での流れの変動に重要な役割を果たしているということが仮定できることが分かった。

次のステップとして、将来、気候が変化した時の TMA における利用可能水量の統合的評価をおこなった。この目的のために、物理学に基づいた semi-distributed 水均衡モデルを作成した。利根川流域は複雑な河川システムの一例であり、上流域に八つの多目的の貯水池をもつ。これらの貯水池は流域内で、水力発電、灌漑、工業用水や家庭用水など、水資源の管理の上で重要な役割を果たす。他にも利根川の利用可能水量に影響を与える自然の、人工のあるいは社会経済的ないくつかの要因がある。統合的評価とはここでは、自然と人工の水システムの変化を需要と供給の両方の側から評価することを意味する。利根川上流域での人間活動を注意深く調査することで、利根川の利用可能水量に影響を与える二つの主要な人工のシステムとして、灌漑のための取水と貯水池での流量調整が選択された。そこで、現実の水の流れを適切に表現するために、気候、水文学、人による水使用など、全てのシステム構成要素間の相互作用をモデルの中で適切に記述した。TMA における利用可能水量の変化は、自然の水文学的バランスと人による水使用の両方の、起こりうる全ての変化の統合的な影響からもとまると考えられる。

TMA における将来の利用可能水量を評価するためには、おそらく、将来の気候の予測が最も重要なステップである。複雑な大気循環システムとその水圏との間の相互関係についての知見が不足しているため、将来の気候の正確な予測は依然として、ほとんど分かっていない。こうしたケースでは、将来の気候シナリオを仮定する手法が一般的に用いられる。将来の気候シナリオをもとめるためには、水文学的シナリオ、GCM シナリオ、古気候学シナリオなどのいくつかの手法がある。本研究では、水文学的シナリオと GCM シナリオを用いた。水文学的シナリオとしては、1°C、2°C、3°Cの気温上昇と+10%と-10%の降水量変化を仮定した。自然の水文学的均衡や農業用利用水、TMA における水需要の、起こりうる変化の統合的な影響から、TMA における利用可能水量への気候変化の影響をもとめた。3°Cの気温上昇と-10%の降水量変化を仮定した、最悪の気候変化シナリオの場合、水需要が最大になる 4 月から 7 月の間、利根川の流量は約 30~50%減少することが推定された。もうひとつのシナリオとして、地域気候モデル（国立環境研究所（NIES）によって開発された GCM の予測値を土木研究所（PWRI）がダウンスケールしたもの）と統計学的ダウンスケール技術（農業生物資源研究所（NIAR）より）の両方による GCM をダウンスケールした値を用いた。大気中の CO₂濃度を現在の二倍とした場合の全てのケースで、2~5°Cの気温上昇が推定された。しかし、降水量の傾向は、モデル間で異なった。スケールダウンされた値を用いた地域気候モデルでは、一年のうち、ほとんどの月で、降水量や利根川への雨水の流出量がより少なくなることが予測された。CO₂濃度が現在の二倍となるシナリオでは、一年のほとんどの期間で約 40~60%の流量の減少が観測された。ところが、四つの異なる GCM (CSIRO-Mk2, CGCM1, CCSR-98, ECHAM4) から統計学的にスケールダウンした GCM の予測値では、年間を通しての、降水量変化と利根川の流量の結果が異なった。概して、栗橋地点での流量の予測値は、4 つの全ての GCM で、7 月から 9 月の間は増加し、4 月から 5 月の間は減少し、他の月では一定の傾きでわずかに増加するか減少するかのいずれかだった。7 月から 9 月の間の流量増加量は約 20~40%だった。4 月から 5 月の間の流量減少量は約 25~50%だった。

ダム湖や他の人工的な河川の調整の影響を考慮した後、水量の観点から TMA における利用可能水量をもとめるために、リスク概念に基づく方法でモデルの結果をさらに分析した。TMA での水需要を含む栗橋地点での必要になる目標流量は、月ごとに異なると仮定した。risk、reliability、resiliency、vulnerability の四つの指標を仮定し、推定した。前述のモデルで観測された月別の流量変化は貯水池による水量調整効果を考慮しなかったものだったが、ここでは上流域での八つの多目的の貯水池の存在を考慮した。水文学的シナリオでの最悪のシナリオで、水需要が最大となる期

間で約 30～50%の流量の減少が見られたが、貯水池による調整を考慮した後では、同期間でのシステムの **reliability** は 13%の減少しか観測されなかった。他の GCM シナリオでも同様の結果が得られた。このことは全体としての TMA における水資源システムの安定性を示す。

本研究の最後で、TMA における最悪のシナリオでの水の利用可能性を改善するためのいくつかの対応策について議論した。流量変動による影響を弱めるのに貯水池の存在が効果的だということが分かったが、自然や生態系へのダム建設による様々な形での有害な影響を考えると、ダム建設を唯一の解決法とすることは思いとどまらせられる。そこで考えられる代替案として、下水の再利用、雨水利用、水需要管理、土地利用管理がある。TMA における高い経済水準を考えると、水需要管理は魅力的でないと結論づけた。同様に、将来における土地利用の変化に対する、利根川の水の流れの感受性も高くないと予想される。他方で、下水の再利用は大きな寄与がある可能性があり、持続可能な解決策だと考えられ、また、経済的利益もあると考えられる。新しい貯水池を建設する代わりに、現在ある貯水池による流量調整機能を、運転管理によって最大限利用することもシステムの安定性の向上につながる。

この流域では、一ヶ月の降水量が大きく変動するため、平均的な月ごとの気候変動から予測した前述の流量変動は実際の TMA の利用可能水量と乖離するかもしれない。そのため、予想される将来の降水量変動を考慮するために、過去における月ごとの降水量変動の性質を将来予測のために修正させて、モンテカルロシミュレーションを行なった。この時得られた利用可能水量シナリオでは、前述のシナリオよりも利用可能水量がずっと小さくなった。特に 4 月から 5 月の期間中、この水系における **reliability** の減少は 60%にも上った。また、冬の全ての月で **reliability** がより小さくなった。この事は、夏季の水需要ピークとともに、流域内の流量が少なくなるため、冬季の利用可能水量が小さくなることについても考えさせられる。最後に、貯水量の調節、下水の再使用、雨水利用、水需要管理、土地利用管理などの適応策についての定性的な評価について議論した。