

平成20年度 (財)新技術振興渡辺記念会
委託調査研究報告書

平成20年度

水資源・水災害危機に関する調査研究

成果報告書

平成21年5月（2009年5月）

社団法人 **資源協会**
NIPPON RESOURCES ASSOCIATION

要 旨

3-4 水道用水のコスト・エネルギー評価

本章は地球環境問題が水道に与える影響として水循環的視点での影響を整理した上で、特に地球温暖化対策としての水道の役割について、ライフサイクルエネルギー評価事例ならびに福岡都市圏 N 市での水道事業施設の運用エネルギー量の試算結果を考察してまとめた。さらに、1970 年代に急速に都市化が進展した N 市における水源と水道が抱える課題ならびに約 60 万人の水道水源のほとんどを地下水に依存している熊本市の地下水状況を概説するとともに、熊本地域特有の水循環機構を踏まえて地下水の量と質に関する課題を整理したものである。

● 「地球環境問題と水道」

地球環境問題は、二酸化炭素排出量の増加問題に加え、エネルギー問題や資源・食料問題とも密接に関係していることを整理した。これは、問題間の影響媒体として、水や物質の循環機構が介在しており、地球環境要素である水、大気、地盤、植生などの汚染や破壊が進んだ結果、これら自然の循環維持機能が失われつつあることの証である。例えば、水循環と地表土壌生物には相互依存関係があり、安定した水循環を維持するためには、多様な生態系を保全することが不可欠である。また、地球温暖化による水道への影響要因を都市化要因も考慮して水量と水質に分けて整理した。

● 「水道のライフサイクルエネルギー評価と水源問題」

広域導水に水源の約 30%を依存する福岡都市圏 N 市での水道給水原価と供給単価を調査した。その結果、固定費である減価償却費、受水費、支払利息が給水原価全体の 73%を占め、給水原価を押し上げ高止まりさせている。水道の安定供給のため、市域内だけで水源を全量確保できず、市域外の水源にも頼らざるを得ない。その結果として水道水コストの上昇を招いており、水道経営を困難にしている。

また、水道の建設から撤去までの所要エネルギー量であるライフサイクルエネルギー調査事例〔「大都市生活のライフサイクルエネルギー」(社)資源協会〕ならびに N 市における運用エネルギーの試算結果を基に、地球温暖化対策としての省エネルギー対策について考察した。運用エネルギーは浄水施設でのポンプなどの動力用電力使用によるエネルギー消費量が最も多く、このため、清浄な水質の原水を汚さずに、そのままの状態で保全することが基本的な対策の一つであることが分かった。さらに、消費エネルギー量（建設エネルギー量を含む）が増加する下水道のライフサイクルエネルギー試算事例も加えて検討し、人工的水循環系の代表である上水道と下水道を合わせた省エネルギー対策についても考察した。下水道の水質が上水道の原水の水質に大きく影響を与えるような場合には、原水は清浄な水質と豊かな水量を保つように流域全体の健全な水循環の管理・保全が重要な対策になる。

● 「水源及び水道に関する課題事例」

福岡都市圏 N 市域での水循環解析に基づいた地下水と表流水を合わせた水収支調査事例を踏まえ、水源及び水道に関する課題として、a) 自己保有水源率の低下、b) 非常用水源としての地下水利用の必要性、c) 水需要量増への対応と水道経営課題、d) 水道用水水源の水質保全などについて整理した。

また、水道水源を地下水に依存する熊本市では、広域地下水位の低下傾向と硝酸性窒素濃度の上昇傾向が見られる。これらの地下水の水量と水質の問題は、熊本地域特有の自然的水循環系と水田涵養を中心とした人為的水循環系が複合した水循環機構が関係している。これら水循環機構特性に基づいた白川中流域での“水循環型農業”と称する休耕田への湛水事業など水環境保全と農産物の品質向上による地域活性化の両立を目指した新しい地域の取り組みも紹介した。

3-4 水道用水のコスト・エネルギー評価

3-4-1 地球環境問題と水道

(1) 地球環境問題

地球環境問題には、1)地球温暖化、2)オゾン層の破壊、3)酸性雨、4)熱帯雨林の減少、5)砂漠化・土壌浸食、6)野生生物の種の減少、7)海洋汚染、8)有害物質の越境移動、9)開発途上国の環境汚染などがある。その発生・拡散プロセスで大気、水、土壌など気圏と地圏を構成する多くの環境要素が広域的に長時間かけて相互に関わっている。さらに、人間の世界的な経済活動と密接に結びついており、大量に資源を消費する先進国と資源を供給する側の発展途上国との間の経済格差問題や世界経済の相互依存関係などと深く関連し合っている。

1992年の地球サミット（環境と開発に関する国連環境開発会議）において、各国は国連憲章などの原則に則り、自らの資源を開発する主権の権利を有するとともに、自国の開発行為が他国の環境汚染をもたらさないように確保する責任を負うことを基本とする「リオ・デ・ジャネイロ宣言」を採択した。これを機に地球規模の環境問題が国際的に認識されるようになり、1988年に設置されたIPCC(気候変動に関する政府間パネル)により地球温暖化に関する科学的な知見の評価、温暖化の環境的・社会経済的影響の評価、今後の対策のあり方の3つの課題について議論されるようになった。また、この地球サミットでは、21世紀に向けた持続可能な開発を実現するための具体的な行動計画である「アジェンダ21」も採択された。これを受けて我が国でも、国や地方自治体レベルでのアジェンダ21の行動計画やローカルアジェンダなどが策定されている。

地球環境問題の一つである地球温暖化は、温室効果ガスの一つである二酸化炭素の排出量の増大に人間の社会活動にともなうエネルギー消費が大きく関与している。このため、経済発展の基礎となる資源開発と温室効果ガス削減による地球環境対策を両立させる道筋は、各国が自国に与える経済的な影響を懸念しているため、国際的なコンセンサスを得ることが非常に難しくなっている。先進国の国別温室効果ガス削減中期目標の設定に際しては、各国の一人当たり国内総生産や省エネルギーが進んだ国への配慮など、指標の公平性をめぐって議論がなお続いている。ポスト京都議定書の枠組みづくりでは、主要排出国の責任ある形での参加が求められている。二酸化炭素排出量削減策の中・長期的ビジョンを参加国が共有し、公正で公平なルールと実効性のある施策づくりを目指す必要がある。

地球環境問題は、さらにエネルギー問題や資源・食料問題とも図-3.4.1に示すように互いに密接に関係している。これらの問題間には影響媒体としての水や物質の循環機構が介在している。このことは、産業の近代化や経済発展の過程での鉱物資源やエネルギーの大量生産ー大量消費ー大量廃棄により、地球環境構成要素である水、大気、地盤、植生（森林）などの汚染や破壊が進んだ結果、これらの自然の循環機構が有する環境維持機能や自己再生（修復）機能が失われつつあることを示している。そして重要なことは自然の循環機構の再生には、消費型の鉱物資源とは異なる再生可能で多様な生物資源が必要であるということである。すなわち、人間の生活や社会活動に不可欠ないろいろな自然の循環系を維持、持続させるには、生物多様性の保全の重要性を認識する必要がある。

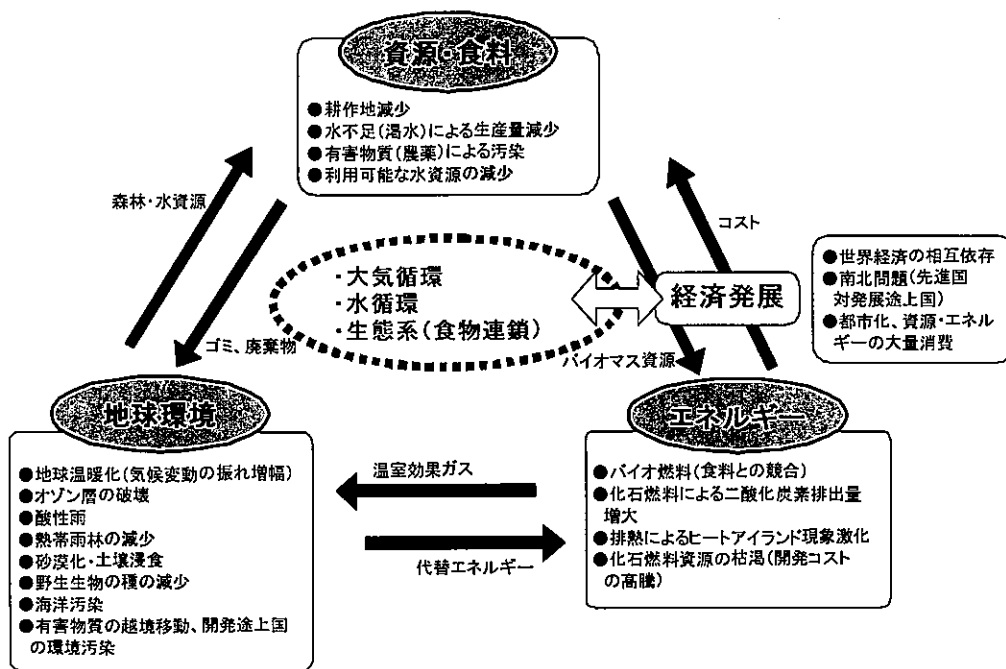


図-3.4.1 地球環境問題とエネルギーや資源・食料問題との関係

(2) 生態系と水循環

人間も含めた動植物が地球生態系の一員として共存していくためには、地球環境をこれ以上に悪化させないようにすることが危急の課題である。

しかし、近年、野生生物の種の絶滅が過去に例を見ない早さで進行している。その原因の一つは、拡大した人間活動による生物の生息環境の劣化や生態系の破壊が大きく影響している。このような認識の下に、前記の地球サミットで168ヶ国が生物の多様性の包括的な保全と生物資源の持続可能な利用を目指す「生物の多様性に関する条約」に署名している。条約締結国は2010年までに生物多様性の損失速度を顕著に減少させることを目標に、沿岸域の埋め立てや森林伐採による生物の生息域の消失、外来生物の侵入などへの対策を連携して行っている。

生物の生息場や繁殖場としての水域や森林の保持には水が不可欠であり、水環境は地球生態系を支える根源的な環境要素である。豊かな水環境を維持するには、雨水が地表にしみ込み、あるいは蒸散し、地表水や地下水になって流れ、川や湖沼に湧出する一連の安定した水の循環機構が維持されることが必要である。また、逆の視点に立てば、地表の植生や土壌生物が水循環経路をつくり、維持する重要な役割を担っているということである。

森林土壌の表層部には、葉や枝が半ば分解されてできた腐食に富む柔らかい層がある。ここには土壌小動物の他に、種々の菌類や微生物が多数生活している。彼らは落ち葉や枯れ枝、動物の死骸や排泄物などの有機物を分解して無機物にして樹根から養分として吸収できるようにする物質循環の重要な担い手である。樹木は枝葉で雨水を受け、一部を遮断蒸発させるとともに、その下の低木や下草などが多段的に雨水を受けながら一部を地上に到達させ、土壌水分の調節を自然に行い土壌生物の生息に必要な環境を提供している。土壌生物の生息場である森林土壌には、樹木の根茎の成長と枯死によって形成されるルートチャネル(草木根が腐朽してできた管状の孔隙)やミミズなどの土壌生物の移動跡空隙が土壌粗孔隙を生成し、これが雨水の浸透・貯留に大きく関与している。

水の循環系は、その循環場のスケールにより樹木周りのミクロ水循環系から流域や地球規模の

マクロ水循環系などが、大気循環や生態系の介在を受けながら相互に組み合わさった多様な循環機構により構築されている。その結果、年間の気象変化パターンに合わせた安定した水の流れをつくり出す水循環系が維持されている。このように多様な生態系の維持と安定的な水循環系の維持は、互いに密接に関係している。

(3) 地球規模の循環系

以上のような多様で安定した水循環をつくり出す基になっている地球規模の循環機構のしくみを概説する。

図-3.4.2 に示すように、地球規模の大気や水の循環の駆動エネルギーである太陽光は、先ず大地を加熱し、その輻射熱で大気を暖める。これにより大気は軽くなって上昇する。また水を温めて蒸発させる。水蒸気は大気よりも分子量が小さくて軽く、また温室効果ガスの一つなので地表の熱を吸収して暖まり、大気をさらに軽くして、大気の上昇を加速し、上昇気流となる。大気は、高度が上がると気圧が下がるので温度が下がり、水蒸気は液化または固化して、雨や雪になって地表に戻る。¹⁾

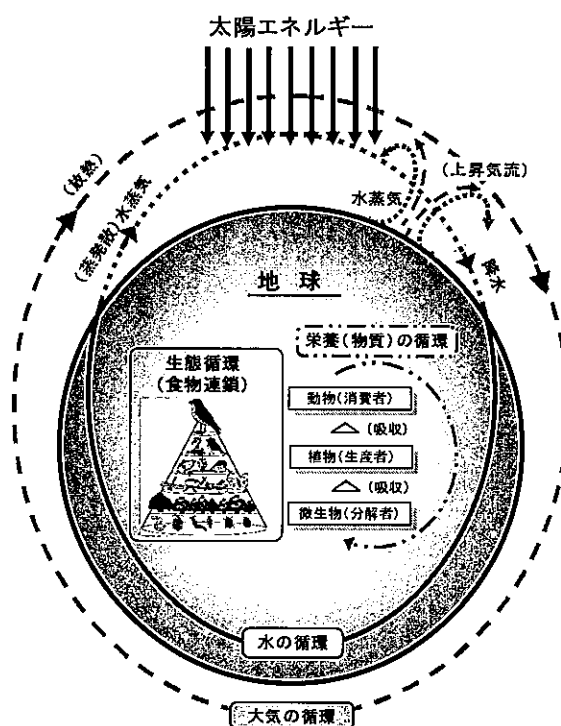


図-3.4.2 地球規模の循環系の概念図

このように、大気の循環は地表水→水蒸気（蒸発）→降水→地表水というように同時に地球規模の水の循環を発生させている。大気は水蒸気から水滴が変わるとき熱を貰ってさらに上昇し、対流圏の上部（平均気温マイナス23℃）に達して、宇宙に向けて低温放熱する。熱を失った大気は重くなるので、再び地表まで降りてくる。このように、太陽光をエネルギー源とした大気の循環が水の循環と相互に熱を交換しながら巨大な地球規模の循環系をつくっている。

大気と水の循環により地球上で自然的、人工的に発生した余分な熱は宇宙に捨てることができ、地球上の大気圏の温度上昇を抑えるはたらきをしている。しかし、地球上で発生した余分な

物質は、地球の重力によりそのままでは宇宙に捨てることができない。この余分な物質を処理するしくみが生態系である。¹⁾

地球の表面は、森や草地など植物、そして動物、微生物、菌類などの多様な生命体が生活している。生態系が維持されているしくみは、植物は土から窒素、リン（磷）、カリウムなど栄養素（養分）を得て、光合成をして育ち、動物のえさになる。そして植物や動物の死骸は微生物や菌類が分解して、栄養素（有機態）を土に戻し、再び植物の成長過程で吸収される（無機態）。このように、生態系は土から始まって土という元の状態に戻すしくみである（物質循環—栄養循環）。

生命活動で生じた余分な物質は、この生態系の循環（食物連鎖）によって、すべて熱に変換されて廃熱と水蒸気として生態系の外に排出される。すなわち、生態系は余分な物質を熱の形にして大気に渡すことで、余分な物質を宇宙に捨てる重要な仲介者としての役割を担っている。¹⁾

以上のように、大気の流れや水の循環、生態系（食物連鎖）が、人類の持続的な発展の基本となる地球環境の保全や安定維持に重要な役割を果たしている。したがって、人間活動により発生する余分な熱や物質の環境への負荷速度が、これら自然の循環速度を超えない範囲に抑える必要がある。

すなわち、人間による環境への負荷は、自然の環境が有する浄化能力や再生能力が十分機能して、大気循環や水循環、生態系が維持され、それぞれが有する地球環境保全・再生（修復）機能が発現し続け得る限界の負荷量と負荷速度を超えてはならないということである。人間社会の持続的な発展を目指すという観点に立てば、今後は自然の環境容量を静的に捉えるのではなく、環境容量に環境時間の考え方を加味した動的な環境容量、すなわち「循環容量」という考え方で捉える必要がある。²⁾ したがって、開発行為に対する沼地や溪流の魚類・植物へのこれからの環境影響評価は、生息・生育場への影響だけでなく、生育環境における水や物質の循環量（水・物質収支変化）やその動態などへの影響にも着目した評価が求められるようになる。

（４） 水循環的視点での地球温暖化による水道への影響

地球温暖化による水道への影響の構図を整理して図-3.4.3 に示す。水道は自然的水循環系に対して人間の都市活動に不可欠な施設として造られた人工的水循環系の主要な構成要素である。

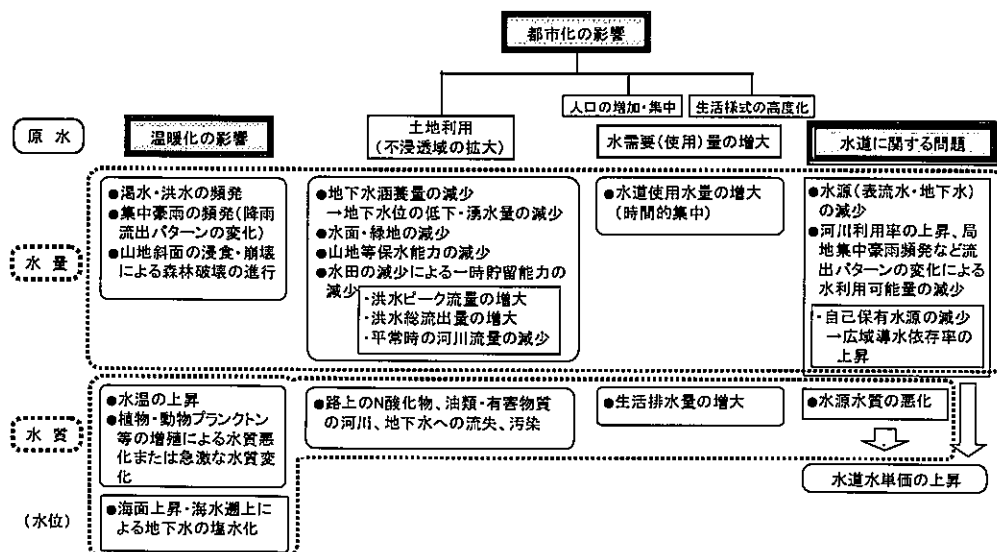


図-3.4.3 地球温暖化による水道への影響構図

水循環的視点における都市化を代表する要因としては、不浸透域の拡大と生活様式の高度化・人口の集中による水需要量の増大がある。水道に与える影響として、原水の量と質とに分けて考えることにする。また、水道に関する問題に着目すれば、地球温暖化と都市化の影響度合は必ずしも正確に分離できるとは言えない。

現象として見れば、都市化の影響は、より短期的であり、より急激的である。特に水循環系として考えた場合、降水が地圏における水循環の出発点となる地表面に到達して表流水や地下水へ転化する量は、地表の土地利用に大きく影響される。例えば都市化が進めば不浸透域が拡大して水循環系が断絶されることになる。これは、水循環が生態系を含め多様な循環系に相互依存しながら連続性を保っていることを考えるとインパクトが最も大きい。

図-3.4.3 から量的な影響では、渇水・洪水の頻発や局地的な集中豪雨の頻発による降雨流出パターンの変化により、ダムや取水堰での無効放流量が増加して、河川総流出量に対して有効に取水し利用できる水量が減少する可能性がある。一方、質的な影響では、水源地域でダム湖や湖沼の水温の上昇によるプランクトンの異常発生による貯水池水質の悪化や下流域では平常時の河川流量の減少による水質の悪化などが挙げられる。

また、水道事業は、全国の年間電力供給量の約 1.1% (1990 年度) ～0.9% を消費しているエネルギー消費産業の側面も有している。地球温暖化問題と関連するエネルギー問題としての二酸化炭素排出量すなわち電力使用量については、都市化域の拡大にともない水道施設の立地条件の制約からこれまでの自然流下式からポンプ加压式の採用が多くなる傾向にあること、原水の水質の悪化にともなう高度処理の導入により浄水場の電力使用量が増加する傾向にあることから、図-3.4.4 に示すように給水量の増加とともに電力使用量が年々増加している。³⁾

水道は、循環資源である水を利用する水循環系の一構成要素であり、水循環系の能力を超えた過剰な取水が水循環系を人為的に攪乱し、さらに水道水を利用した後の下水が水循環の量と質に影響を及ぼしている。一方で、水の循環系が健全に機能していることは、より安定した良好な原水を得るための必要条件である。⁴⁾ このように、地球温暖化に起因する問題は、水環境の悪化にともなう水源水質の劣化、渇水頻発による水利利用可能量の減少、都市化による水需要量の増大と下水処理量の増大、さらにはエネルギー資源の高騰による水道施設維持管理費のコストの上昇など問題をより複合化・複雑化させてきている。

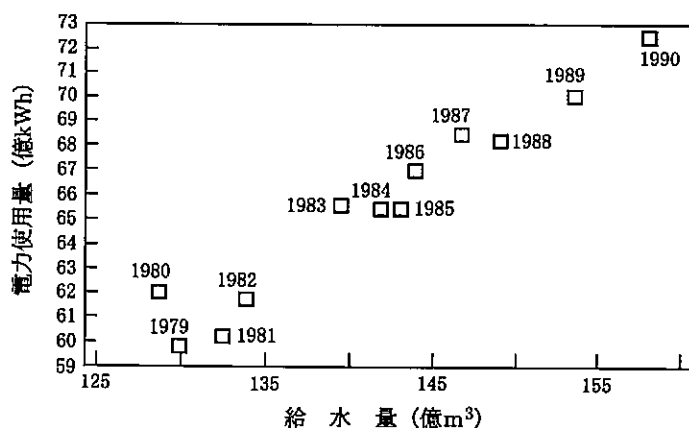


図-3.4.4 給水量と電力使用量の推移
(出典:「地球環境時代の水道」³⁾)

3-4-2 水道のライフサイクルエネルギー評価と水源問題

(1) 福岡都市圏N市の水道水コスト

① N市の概要

市域面積約 26.9 km² の N 市は、福岡市の南に位置し、福岡都市圏のベッドタウンとして発展してきた。人口は図-3.4.5 に示すように、1970 年代から大規模な住宅開発が活発化した結果、1972 年の市制施行の 36,757 人から 2002 年までの 30 年間に約 2.4 倍の 91,800 人に急増した。給水量は人口の急増に伴い 1965 年以降に急激に伸びてきたが、1998 年以降横這い状態で推移している。

市の水道水源は、自己保有水源である表流水に約 25%、地下水に約 45%と広域導水である福岡導水（福岡地区水道企業団（以下、企業団と称す））に約 30%を依存している。各水源別取水量の推移を図-3.4.6 に示す。水道用水は、1983 年までは市内の表流水と地下水で賄っていた。しかし、その後の人口の急増により、水需要量が増大したため、福岡導水により約 25km 離れた筑後川水系に依存するようになった。また、2005 年から運用が開始されている福岡都市圏海水淡水化事業にも参加している。

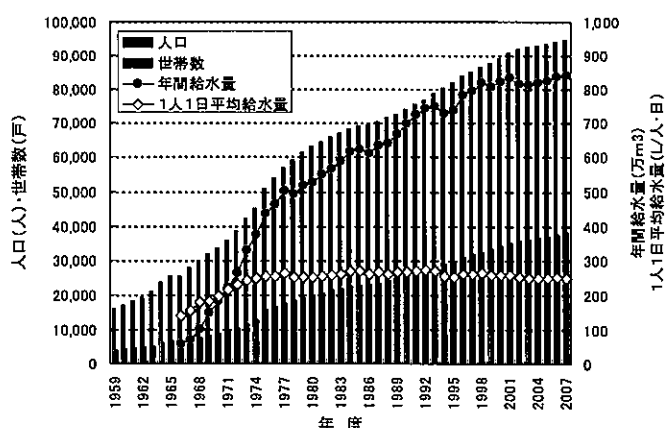


図-3.4.5 N市の人口および年間給水量等の推移

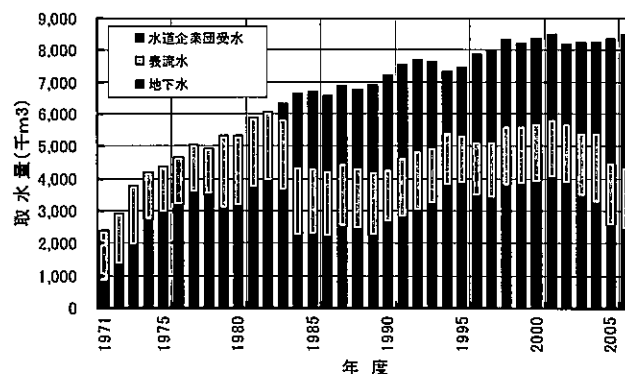


図-3.4.6 N市の水源別取水量の推移

西日本一帯が渇水に見舞われた 1994～1995 年渇水では、福岡導水の給水制限を受けて受水量が減少した。それに加えて、U 川からの表流水取水も減少したため、地下水取水を増やして補っている。なお、1998 年以降の総取水量は横這い状態にある。

全国主要都市における 2003 年の 1 人 1 日平均給水量を表-3.4.1 に示す。1 人 1 日平均給水量は、福岡市、札幌市、千葉市、さいたま市が 300 L/(人・日)以下で、これら 4 市が全国主要都市の中では少ない。都市規模が異なるため一概には比較できないが、N 市は 247 L/(人・日) とさらに少ない。また、図-3.4.5 に示す 1 人 1 日平均給水量が 1997 年以降で、それまでの横這い状態からやや減少傾向にあることが分かる。

これは、福岡都市圏に一級河川がないことや河川延長が短く河床勾配が急なため流出が早いなど水利上、不利な自然的条件にあり、渇水に脆弱なことを背景に、市民の節水意識が元々高かったことや節水コマ付き水栓の普及など、市民と行政が一体となって“節水型都市づくり（1997 年条例施行）”に取り組んできた結果であると推察される。⁵⁾

表-3.4.1 全国主要都市における1人1日平均給水量

都市名	給水量			
	年間 給水量 ($\times 10^3 \text{ m}^3$)	給水人口 (人)	1人当り 給水量 ($\text{m}^3/(\text{人} \cdot \text{年})$)	1人1日 給水量 ($\text{L}/(\text{人} \cdot \text{日})$)
N市	8,114	89,929	90	247
福岡市	145,945	1,366,100	107	292
札幌市	196,328	1,848,349	106	290
仙台市	126,080	1,000,824	126	344
新潟市	76,446	515,489	148	405
千葉市	89,425	874,988	102	279
さいたま市	113,659	1,060,518	107	293
東京都(注)	1,103,312	8,355,536	132	361
横浜市	435,769	3,538,250	123	337
川崎市	176,790	1,297,757	136	372
名古屋市	299,054	2,293,321	130	356
京都市	218,788	1,453,999	150	411
大阪市	486,487	2,627,421	185	506
神戸市	200,652	1,511,012	133	363
広島市	147,296	1,162,857	127	346
高松市	44,696	328,107	136	372
北九州市	129,223	991,399	130	356
熊本市	85,060	650,652	131	357
那覇市	40,479	308,225	131	359

2003(平成15)年度各都市統計資料

注) : 区部

② 水道水の給水原価

N市は、1970年代の人口の急増に伴う水需要量増に対する水源確保と渇水時の安定給水を目的として1983年より福岡導水(企業団)から受水を開始している。福岡市と水道水源を100%地下水で賄っている熊本市との2007年度の給水原価と供給単価を比較したものを表-3.4.2に示す。

表-3.4.2 2007年度の給水原価と供給単価

		N市		福岡市		熊本市	
給水人口(人)		92,582		1,417,600		655,150	
有収水量(m^3)		8,022,630		141,921,348		73,554,853	
項 目		給水原価($\text{円}/\text{m}^3$)	比率	給水原価($\text{円}/\text{m}^3$)	比率	給水原価($\text{円}/\text{m}^3$)	比率
給 水 原 価	支 払 利 息	30.83	12.8%	33.74	14.3%	21.26	14.6%
	減価償却費	79.69	33.1%	61.56	26.2%	48.80	33.5%
	職員給与費	20.31	8.4%	24.05	10.2%	35.80	24.5%
	動力費	7.11	3.0%	2.73	1.2%	6.61	4.5%
	修繕費	4.64	1.9%	10.81	4.6%	30.99	21.2%
	材料費	0.41	0.2%	0.45	0.2%	—	0.0%
	薬品費	1.03	0.4%	1.29	0.5%	0.13	0.1%
	受水費	65.48	27.2%	51.50	21.9%	—	0.0%
	その他	31.12	12.9%	49.28	20.9%	2.26	1.5%
合 計		240.62	100.0%	235.41 (214.31) 関連収入考慮	100.0%	145.85	100.0%
供給単価 (2007年度)		201.22	—	228.13	—	168.32	—

注) : データは各市の水道局HPより

・路面復旧事務費を修繕
費に加えた・維持管理費と業務費を
修繕費とした

給水原価は支払利息、減価償却費、職員給与費、動力費、修繕費、材料費、薬品費、受水費及びその他で構成されている。水道事業規模が大きく異なるが、本市の2007年度の給水原価は、地下水を水源としている熊本市より約65%も高い240.62円/m³である。2006年度の水道事業経営指標による給水原価の全国平均（都及び指定都市）185円/m³に比べても約56円高い。費目別では1m³当たりの減価償却費は福岡市、熊本市より18～31円高く、受水費は福岡市より14円高い。また、減価償却費、受水費、支払利息などの固定費だけで給水原価全体の73.1%を占めている。

また、供給単価201.22円に対して1m³当たり約39円のコスト超過になっており、水道利用加入金などの他の収入により収支バランスを取っている状況である。図-3.4.7の推移を見ても給水原価が供給単価を毎年慢性的に上回っている。市最大の浄水場改良を含む拡張事業が2001年に完成した後に給水原価が240円を上回るようになった。水需要量が右肩上がりで増える時代では浄水量を増やすと水道料金収入量も増えた。しかし、水需要量の伸びが鈍化して浄水量が横這いになっても水道給水費用の殆どが固定費のため、給水原価は下がらない。節水により水道使用量が減少するとさらに水道料金収入が減り、水道会計が逼迫する主因となっている。

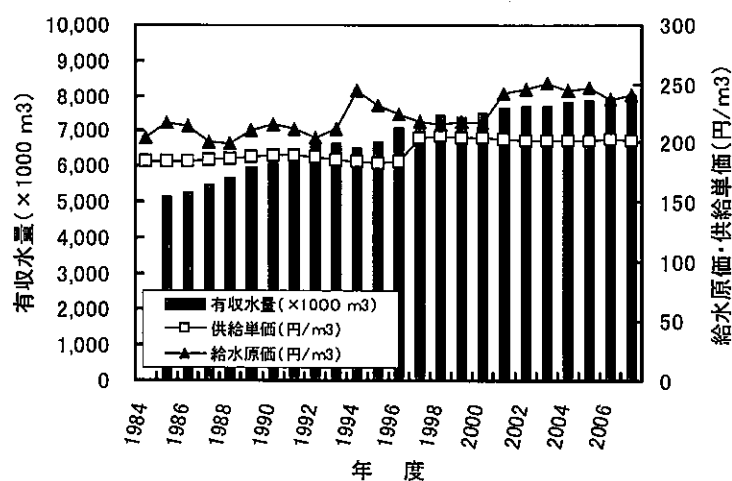


図-3.4.7 N市の給水原価と供給単価の推移

減価償却費については、償却期間を長期に取ることにより、現時点での給水原価をなるべく低く抑えようとするが、後世へ受益以上の負担を強いることになる可能性もある。

受水費は1978年と1994年の大渇水の経験を踏まえ、水源の広域化を目指し、1983年の福岡導水事業と2005年の福岡都市圏海水淡水化事業への参加を通じて企業団受水への依存率が高くなるにしたがって増えている。その反面、浄水原価が低い自己保有水源である地下水への依存率が下がり、結果的に給水原価を押し上げる要因になっている。

薬品費と動力費は経費削減が可能な費目である。薬品費は原水の水質に関係している。有機物を削減すると浄水場から送り出した水道水中の残留塩素が消費されにくくなる。原水の水質が良好であれば、浄水場での塩素使用量を減らすことができるので薬品費を削減できる。さらに、水道水の味が低下しにくくなる。また、定期的な水質分析の間隔を長くすることができるので試験委託費やポンプ運転費などを含めたトータルでの浄水費を削減できる。

節水意識が浸透した結果として、給水量は横ばい状態となり水道料金収入が増えない中、施設の老朽化対策や耐震補強などの維持管理費の負担が増大して、水道事業経営が困難になってきている。さらに、最近、福岡都市圏では大型のホテルや商業施設などの大口需要者が水道の高料金から逃れるために地下水に水源を求め、専用水道として自立する動きが広がっている（地下水ビジネス）。⁶⁾ このような水道を取り巻く諸状況を踏まえると、地下水や雨水利用を含めた市域の未使用水資源賦存量の把握や市域の水循環地域特性を踏まえた水利用方法の再評価が求められている。また、近隣の同様な問題を抱える自治体間で水道事業の広域化を図り、浄水場や配水施設の集約化によりスケールメリットを活かして維持費を削減するなど、抜本的な改革も今後は必要になってくるものと考えられる。

（２） 水道のライフサイクルエネルギー評価

① ライフサイクルエネルギー

全国の年間電力供給量の約 1%を消費している水道事業が地球温暖化問題に対して貢献すべき対策としては、直接、間接に化石燃料の消費を減少させ、二酸化炭素排出量を抑制することである。そのためには、省エネルギー対策を進める必要がある。種々の省エネルギー対策を考える場合には、原水を取水し水道水として各家庭へ配水するまでの取水施設、導水施設、浄水施設、配水施設などの水処理工程の各施設ごとの現在のエネルギー使用状況を把握することが必要である。

水道事業の省エネルギーを考える場合、直接消費する電力にとどまらず、資材の製造や布設工事に使用されたエネルギーを含めたトータルとしての省エネルギーを考える必要がある。地球温暖化問題に対して有効な対策となるためには、イニシャルとランニングのすべてを含んだライフサイクルエネルギー消費ないしは資源消費を最小化することが重要である。³⁾

水道事業のライフサイクルエネルギーに関する体系的な既往調査は少なく、1992 年の水道と地球環境を考える研究会による「地球環境時代の水道」や 1999 年の社団法人資源協会による「大都市生活のライフサイクルエネルギー」などに限られている。

「大都市生活のライフサイクルエネルギー」では、評価モデルとして Y 市が保有する水道事業施設を選定して、水道事業施設のうち各設備・装置を造るのに必要なエネルギー量、例えば生コンクリートを使用した量と、エネルギー原単位を掛けて設備投入エネルギー量を算出するほか、輸送、据付け、建設に必要なエネルギー量を積み上げるとともに、さらに各設備・装置に使用した電力量、維持管理等に消費したエネルギー量を積み上げた運用エネルギー量を加え、総エネルギー量を算出している。そして、総エネルギー量は年間浄水処理量で除すことにより、水道水 1 m³を供給するために必要なライフサイクルエネルギー原単位として試算している。ライフサイクルエネルギー原単位の試算概要は以下のとおりである。

評価モデルは、Y 市が維持管理する自然流下系統の水道事業施設で、1 日最大処理能力 400 千 m³、1992 年度の年間浄水処理量 124,342,300m³である。水源は重力式コンクリート型の多目的ダムで取水施設及び浄水施設のうち排水処理施設においては、共同する他の利水団体との浄水処理量をベースにしたアロケーションによる分担設備として評価を行っている。

評価モデルについて、水源、導水、浄水、送水、配水の各施設ごとに設備投入エネルギー量と

運用エネルギー量に分けてとりまとめた総括表が表-3.4.3 である。設備投入エネルギー量は、設備の構造または用途により耐用年数が異なるため、耐用年数を考慮して年間設備投入エネルギー量を求めたものが表-3.4.4 である。これに運用エネルギー量を加えた総エネルギー量を年間浄水処理量で除すと、

$$\begin{aligned}\text{設備投入エネルギー原単位} &= 16,160,715 \text{ Mcal} / 124,342,300 \text{ m}^3 = 0.130 \text{ Mcal/m}^3 \\ &= 130 \text{ Kcal/m}^3\end{aligned}$$

$$88,760,279 \text{ Mcal} / 124,342,300 \text{ m}^3 = 0.714 \text{ Mcal/m}^3 = 714 \text{ Kcal/m}^3$$

すなわち、水道水 1m³を供給するために必要なライフサイクルエネルギー原単位は 714 Kcal / m³となる。⁷⁾

表-3.4.3 評価モデルにおける設備投入エネルギー量と運用エネルギー量の総括表

項 目	施設名	水源関係			導水関係		浄水関係			送水関係		配水関係	
		ガソリン (Kl)	軽油 (Kl)	電力量 (KWh)	ガソリン (Kl)	軽油 (Kl)	ガソリン (Kl)	軽油 (Kl)	電力量 (KWh)	ガソリン (Kl)	軽油 (Kl)	ガソリン (Kl)	軽油 (Kl)
設備投入エネルギー量	素材エネルギー量(A)	69,036,020 (Mcal)			151,152,675 (Mcal)		135,458,348 (Mcal)			14,347,826 (Mcal)		408,850,246 (Mcal)	
	据付エネルギー量		2.3			99.66		21.09	4,725		17.2		296.3
	輸送エネルギー量		3.9			173.9		84.94			9.55		509.37
	建設エネルギー量	17.0	507.9	5,696,761	136.3	1,858.8	257.9	2,522.7		20.2	49.1	1,876.6	2,375.5
	小 計	17.0	514.1	5,696,761.0	136.3	2,132.4	257.9	2,628.7	4,725.0	20.2	75.9	1,876.6	3,181.2
	Mcal換算基本数値	7.9	9.2	2.25	7.9	9.2	7.9	9.2	2.25	7.9	9.2	7.9	9.2
	小計換算値(Mcal)(B)	134.3	4,729.7	12,817,712.3	1,076.8	19,617.7	2,037.4	24,184.3	10,631.3	159.6	697.8	14,825.1	29,266.8
	エネルギー量計(A+B)	81,858,596 (Mcal)			151,173,369 (Mcal)		135,495,201 (Mcal)			14,348,683 (Mcal)		408,894,338 (Mcal)	
	エネルギー投入比率	0.10			0.19		0.17			0.02		0.52	
	用途別電力使用量	23,563,900 (KWh)			323,300 (KWh)		6,217,000 (KWh)			0 (KWh)		1,792,000 (KWh)	
運用エネルギー量	薬品使用量											(使用材料:136t)	
	据付け・建設・輸送エネルギー量	3.0 (Kl)(軽油)					9.0 (Kl)(軽油)					0.4 (Kl)(軽油)	
	エネルギー量計	53,018,803 (Mcal)			727,425 (Mcal)		13,988,333 (Mcal)			0 (Mcal)		4,865,004 (Mcal)	
							72,599,564 (Mcal)						
	エネルギー投入比率	0.73			0.01		0.19			0.00		0.07	

(1992年度)

注) : 出典:「大都市生活のライフサイクルエネルギー」⁷⁾に一部加筆修正

表-3.4.4 評価モデルの構造・用途別耐用年数を考慮した年間設備投入エネルギー量

エネルギー 構造または用途	総エネルギー量 (Mcal)	耐用年数 (年)	年間エネルギー量 (Mcal)
電気・機械	11,042,708	30	368,090
土木構造物	767,371,840	50	15,347,437
建 物	13,355,640	30	445,188
計	791,770,188		16,160,715

(1992年度)

注) : 出典:「大都市生活のライフサイクルエネルギー」⁷⁾に一部修正

イニシャルコストとランニングコストを合わせてライフサイクルコストというが、同様にライフサイクルエネルギーという概念が設定できる。

次に前記した評価モデルの水道事業施設を含むY市全体の水道事業施設を対象とした大規模水道事業評価モデルでのライフサイクルエネルギー原単位も同様に評価している。すなわち、Y市が管理する水道施設は、単独事業で開発したA系統(河川表流水・自然流下方式)、関係利水団体と共同開発したB系統(ダム湖水:重力式コンクリートダム・自然流下方式)、およびC系統

(ダム湖水・河川表流水：重力式コンクリートダム・ポンプ加圧方式)、そして広域水道事業により開発されたD系統(ダム湖水：ロックフィルダム・ポンプ加圧方式)の4系統である。

大規模水道事業評価モデル(1日最大処理能力：約1,780 千 m^3 、1992年度の年間浄水処理量：491,421,304 m^3)については、先に検討した評価モデルと設備内容を比較分析した結果、設備投入エネルギー量は評価モデルで算出したエネルギー量から年間浄水処理量で引き伸ばして算出している。運用エネルギー量についても評価モデルと同様な手法により各施設が消費した電力使用量を基に算出している。算出結果を表-3.4.5に示す。

$$\text{設備投入エネルギー量} = 491,421,304 \text{ m}^3 \times 0.130 \text{ Mcal/m}^3 = 63,884,969 \text{ Mcal}$$

設備投入エネルギー量と運用エネルギー量を加えて大規模水道事業評価モデルにおける水道水1 m^3 を供給するために必要なライフサイクルエネルギー原単位は1,334 Kcal/ m^3 となる。

$$655,481,760 \text{ Mcal} / 491,421,304 \text{ m}^3 = 1.334 \text{ Mcal/m}^3 = 1,334 \text{ Kcal/m}^3$$

表-3.4.5 大規模水道事業評価モデルの年間運用エネルギー量

施設	エネルギー 年間電力消費量 (KWh)	年間運用 エネルギー量 (Mcal)	割合	1 m^3 当りの年間 運用エネルギー量 (Kcal)
水源施設関係	41,067,829	92,402,615	15.6%	188
導水施設関係	44,869,312	100,955,952	17.1%	205
浄水施設関係	118,988,574	267,724,292	45.3%	545
送水施設関係	—	—	—	—
配水施設関係	58,006,192	130,513,932	22.1%	266
計	262,931,907	591,596,791	100.0%	1,204

(1992年度) 年間浄水処理量：491,421,304 m^3

注)： 出典：「大都市生活のライフサイクルエネルギー」⁷⁾に一部加筆

このライフサイクルエネルギー原単位の増加要因は、水道原水の大半が下流取水により確保されることに伴い、ポンプ加圧方式による導水方法が採用されているため、多量の電力を消費していることによるものである。⁷⁾

表-3.4.3より建設時の設備投入エネルギー量791,770,188 Mcalの施設ごとの分担割合は、水源施設(10%)、導水施設(19%)、浄水施設(17%)、送水施設(2%)、配水施設(52%)で配水施設のエネルギー消費量が多いのは、配水管の布設工事が広範囲にわたることから配水管の材料や工事に消費されるエネルギー量が多いことを示している。

また、運用時の評価モデルでの運用エネルギー量72,599,564 Mcalの施設ごとの分担割合は、水源施設(73%)、導水施設(1%)、浄水施設(19%)、配水施設(7%)、一方、表-3.4.5の大規模水道事業評価モデルでは、運用エネルギー量591,596,791 Mcalで水源施設(16%)、導水施設(17%)、浄水施設(45%)、配水施設(22%)となっている。なお、評価モデルでの水源施設が73%と分担割合が大きいのは、取水施設と導水ポンプに係わる電力使用量を計上しているためである。運用時に浄水施設でのエネルギー消費が多いのは、ポンプを動かすための電力消費が多いことによる。浄水場での水処理工程ごとに水をポンプで回すためのエネルギー消費量が送水施設や配水施設でのエネルギー消費量(ポンプ使用電力量)よりも多いことが分かる。

一方、福岡都市圏 N 市の水道事業施設（1 日最大処理能力：20,770 m³、2007 年度の年間給水量：8,398,631 m³、その内企業団受水量（浄水）：4,094,000 m³）は、U ダムの湖水と地下水を水源とする U 浄水場と河川水と地下水を水源とする K 浄水場の 2 箇所の浄水場とそれに 11 箇所の配水池（K 系統と U 系統の 2 系統）から構成されている。

2007 年度での施設ごとの電力使用量と薬品使用量から年間運用エネルギー量を試算したものが表-3.5.6 である。なお、薬品使用量からエネルギー消費量への換算については、「地球環境時代の水道」における一般的な水質の表流水を取水する浄水場での実績値である次亜塩素酸ナトリウム＝38 Kcal / m³、PAC（ポリ塩化アルミニウム）＝ 10 Kcal / m³、苛性ソーダ＝ 28 Kcal / m³を採用した。

本市の企業団受水は浄水を受水しており、これを考慮して 1m³当りの年間運用エネルギー量を計算した。表-3.4.6 によれば、1m³当たりの年間運用エネルギー量は、2,513 Kcal となり前記した大規模水道事業評価モデルでの 1,204 Kcal の 2 倍程度のエネルギー量である。浄水処理量規模が小さいため、1m³当りの年間運用エネルギー量も相対的に大きくなっている。しかし、N 市の施設ごとの運用エネルギー量の分担割合を見ると水源（取水）施設（13%）、浄水施設（78%）、送水施設（3%）、配水施設（7%）となり、浄水施設が全体の 78%を占めている。原水の浄化処理に大きなエネルギーが消費されていることが分かる。この背景には、U ダム湖の藻類の発生や U 河川の平常時流量の減少による水質悪化があり、2001 年に K 浄水場へ高度浄水処理が導入された経緯がある。このように市域内水源の全体的な水質低下傾向がある。

表-3.4.6 N市の水道事業施設における年間運用エネルギー量

施設	エネルギー	年間電力使用量 (KWh)	薬品使用量(m ³)			年間運用 エネルギー量 (Kcal)	割合	1m ³ 当りの年間 運用エネルギー量 (Kcal)
			次亜塩素酸 ナトリウム	PAC	苛性ソーダ			
水源(取水)施設関係	T取水堰	114,702				1,492,962,750	13.2%	347
	K取水井	510,058						
	U取水井	38,779						
導水施設関係	—	—				—	—	—
浄水施設関係	K浄水場	3,406,200	59.3	69.5		8,793,660,946	77.6%	2,043
	U浄水場	502,092	17.5	21.5	4.2			
送水施設関係	—	129,139				290,562,750	2.6%	35
配水施設関係	K系統配水池	95,789				747,805,500	6.6%	89
	U系統配水池	236,569						
計		5,033,328	76.8	91.0	4.2	11,324,991,946	100.0%	2,513

(2007年度)

[Kcal換算基本値] 電力：2,250 Kcal / KWh 次亜塩素酸ナトリウム： 38 Kcal / m³

年間給水量： 8,398,631 m³

PAC： 10 Kcal / m³

その内企業団受水(浄水)量： 4,094,000 m³

苛性ソーダ： 28 Kcal / m³

「地球環境時代の水道」によれば、浄水施設でのエネルギー消費量（0.644 Mcal）のうち、水処理設備別にはポンプ（65.1%）、薬品処理（13%）、沈殿池（2.7%）、ろ過池（1.1%）、排水処理（11.3%）、その他（6.8%）という分担割合になっており、全エネルギー量の 65%をポンプが消費していることが示されている。また、水道施設全体では、運用エネルギー量（1.338 Mcal）の 81%をポンプ設備が消費しているとされている。同様に薬品処理でのエネルギー消費については、塩素（45.2%）、PAC（12.0%）、苛性ソーダ（33.3%）、電力（9.5%）となっている。これは、塩

素や苛性ソーダは電気分解により製造されており製造過程で電力を多く消費するためである。

原水の水質汚染が進み濁度やBODが高くなると、前処理段階でPACや苛性ソーダの投入量が増える。アンモニア性窒素が増えると塩素の投入量が増えることになるので、省エネルギー対策には、原水の水質を悪化させないような日頃の水質保全対策が重要であることが分かる。さらに、高度浄水処理が必要となった場合には、さらに設備投入エネルギーと運用エネルギーが増えることになる。また、水質悪化に対応するために各家庭に浄水器をつけた場合のエネルギー増加は、水道事業全体で高度浄水処理を付加する場合の約1.5～2倍に相当するという試算もある。³⁾

地球温暖化問題に対する水道の果たす役割を考える場合、水道事業全体と家庭まで含めたトータルの水供給システムとして捉え、トータルとしての省エネルギーを実現する対策を考えることが必要である。省エネルギー対策の基本は、水源の汚染防止であり、高度浄水処理を必要としない清浄な原水を常時確保できるようにすることである。清浄な原水が得られると、前記したように水道の動力費や薬品費などを削減することになるので、給水原価高騰の抑制にも寄与する。

これから全国的に水道施設の更新時期を迎えることになる。更新に際しては、エネルギー消費量の多いポンプ運転の効率化を図る必要がある。そのためには、給水区を見直し配水池の統廃合による広域化やポンプ圧送を極力少なくできる最適地への配水池の移設、配水管圧力の中央制御システムの導入など、省エネルギー対策として検討の余地はある。

② 下水道のライフサイクルエネルギーも含めた地球温暖化対策の視点

水道に利用された後の下水が下水道を通じて再び自然の水循環系に戻されることから、特に都市域の水の量と質に下水道は大きく影響を及ぼしている。このような観点から地球温暖化対策は、水の利用の入口から出口まで一体として捉え、人工的水循環系の主要要素である水道と下水道をトータルで見たライフサイクルエネルギーの視点で考えることが重要である。

その前提となる下水道のライフサイクルエネルギーの評価事例として、「大都市生活のライフサイクルエネルギー」における試算例を下記に示す。

水道事業施設のライフサイクルエネルギー評価と同様にモデル下水道地区を都市として十分な人口、面積、用途別地域のバランスがあり、管きよの排除方式、ポンプ場、汚水処理の普及、雨水対応状況などを考慮してY市KZ地区を選定し、エネルギー評価が試みられている。KZ地区の概要は、下水道整備済面積3,609.6ha（分流式面積：2,778.0ha、合流式面積：831.6ha）、人口396,500人、下水道処理可能人口373,400人、下水道人口普及率94%である。

年間建設エネルギー量は、モデル地区の1990年における下水道事業施設の建設エネルギー量を管きよ、ポンプ場、汚水処理施設、汚泥処理施設の土木建築施設と機械電気設備に分け、積み上げ計算している。なお、素材のエネルギー原単位は「エネルギー原単位 平成6年12月（社）資源協会」及び「総合エネルギー統計 平成3年版 通商産業省」を施工のエネルギー原単位は上水道事業設備を参考にしている。また、年間維持管理（運用）エネルギー量についてもモデル地区の1990年におけるエネルギー量を計算している。

下水道事業施設の年間建設エネルギー量は、各施設の耐用年数による更新を考慮する必要がある。耐用年数は、土木建築が50年、機械電気が30年とし、これらで建設エネルギー量を除して施設、工種ごとの年間建設エネルギー量を計算している。これに年間維持管理（運用）エネルギー量と、これらを合計したライフサイクルエネルギー量を計算した総括表を表3.4.7に示す。

表-3.4.7 モデル地区における下水道事業施設のライフサイクルエネルギー量

エネルギー 区 分	設備区分	汚 水 (Mcal/年)							雨 水 (Mcal/年)		
		管きよ	(中継) ポンプ場	汚水処理施設		汚泥処理施設			管きよ		(雨水排水) ポンプ場
				2次処理	高度処理	消化・脱水	焼 却	消化ガス発電 ・機械電気	管きよ	10年対応	
建 設 エネルギー量	土木建築	21,283,000	28,000	5,471,000	2,243,000	823,000	57,000	0	23,391,000	12,621,000	2,218,000
	機械電気		6,000	755,000	415,000	424,000	2,245,000	94,000			444,000
	小 計	21,283,000	34,000	6,226,000	2,658,000	1,247,000	2,302,000	94,000	23,391,000	12,621,000	2,662,000
	合 計	33,844,000							38,674,000		
		72,518,000 (土木建築: 68,135,000 , 機械電気: 4,383,000)									
維持管理 (運 用) エネルギー量	投入比率	0.29	0.00	0.09	0.04	0.02	0.03	0.00	0.32	0.17	0.04
	維持管理	1,171,000	5,055,000	74,356,000	13,255,000	8,912,000	8,293,000	△ 5,079,000	0	0	2,381,000
	合 計	105,963,000							2,381,000		
		108,344,000									
ライフ サイクル エネルギー量	投入比率	0.01	0.05	0.69	0.12	0.08	0.08	△ 0.05	0.00	0.00	0.02
	施設別	22,454,000	5,089,000	80,582,000	15,913,000	10,159,000	10,595,000	△ 4,985,000	23,391,000	12,621,000	5,043,000
	投入比率	0.12	0.03	0.45	0.09	0.06	0.06	△ 0.03	0.13	0.07	0.03
	汚水/雨水	139,807,000							41,055,000		
	合 計	180,862,000									

(1990年度)

耐用年数 土木建築: 50年
機械電気: 30年

〔消化ガス発電〕	動力用電力量: 855,000KWh/年	1,924,000
補修	:	175,000
発電電力量	: △3,190,000KWh/年	△ 7,178,000
		△ 5,079,000

注): 出典: 「大都市生活のライフサイクルエネルギー」⁷⁾ を参考に作成

建設エネルギー量は、汚水 33,844,000 Mcal/年 (46.7%)、雨水 38,674,000 Mcal/年 (53.3%) で雨水の方がやや多い。施設別では水道と同様に管きよが全体の 61% を占め、対象区域全域に張り巡らされた管きよ網の材料や布設工事でのエネルギー消費量が多くなっている。一方、維持管理(運用)エネルギー量は、汚水 105,963,000 Mcal/年 (97.8%)、雨水 2,381,000 Mcal/年 (2.2%) で、その殆どが毎日稼働している汚水処理が占めている。施設別に見ると、汚水の 2 次処理施設 (69%)、高度処理施設 (12%) で合わせて 81% のエネルギーが汚水処理施設で消費されている。これも水道と同様に汚水の各処理工程で水を回すためのポンプなどの動力用電力使用量が多いためである。

建設エネルギー量と維持管理(運用)エネルギー量を合わせた 1990 年におけるモデル地区のライフサイクルエネルギー量は 180,862,000 Mcal/年である。このうち汚水(汚泥含む)が 139,807,000 Mcal/年 (77.3%)、雨水が 41,055,000 Mcal/年 (22.7%) となっている。モデル地区の年間汚水処理水量 58,652,400 m³/年、年間雨水処理水量 20,069,000 m³/年及び人口 373,400 人で除して、水量原単位、人口原単位を求めると以下のとおりである。⁷⁾

- ・汚水 1m³ を処理するために必要な年間エネルギー量すなわち汚水量原単位:

$$139,807,000 \text{ Mcal} / 58,652,400 \text{ 汚水m}^3 = 2.4 \text{ Mcal / 汚水m}^3 = 2,400 \text{ Kcal / 汚水m}^3$$

- ・雨水 1m³ を処理するために必要な年間エネルギー量すなわち雨水量原単位:

$$41,055,000 \text{ Mcal} / 20,069,000 \text{ 雨水m}^3 = 2.0 \text{ Mcal / 雨水m}^3 = 2,000 \text{ Kcal / 雨水m}^3$$

- ・汚水と雨水を処理するために必要な 1 人当たりの年間エネルギー量すなわち人口原単位:

$$180,862,000 \text{ Mcal} / 373,400 \text{ 人} = 484 \text{ Mcal / (年・人)} = 484,000 \text{ Kcal / (年・人)}$$

前記した大規模水道事業評価モデルにおける水道水 1m^3 を供給するために必要なライフサイクルエネルギー原単位 $1,334\text{ Kcal}/\text{m}^3$ と比較すると、汚水では $2,400\text{ Kcal}/\text{汚水m}^3$ で 1m^3 当たり約 $1,000\text{ Kcal}$ のエネルギーを多く消費していることが分かる。

下水道の省エネルギー対策としては、污水处理施設でのライフサイクルエネルギー量が多いことから、汚水の量を減らすこと、污水处理効率の向上、エネルギー回収やクリーンエネルギーの活用などが考えられる。汚水量を減らすと、例えば、負荷総量が同じであれば $\text{BOD}50\text{ppm}$ で 100m^3 の汚水を処理するよりも 100ppm で 50m^3 を処理する方が処理効率を得やすくなる。⁸⁾ このため、風呂水を洗濯水に利用するなど水のカスケード利用（多段利用）や工業用水の循環利用の推進が必要である。処理効率の向上では、フロック反応槽での微細気泡導入によるブロー消費電力の削減など、各処理段階での省エネルギー技術の開発が期待できる。また、処理施設の電力原として消化ガス発電や下水熱の有効利用など新しい技術の導入も試みられている。二酸化炭素の排出量削減としては、広い場内を活用した太陽光発電の普及も期待される。

水道水中にはフミン質が含まれている上、放流水の消毒に塩素が付加されている。上水の取水口が処理水の放流先に近いほど水道水中のトリハロメタン発生量が増加する危険性がある。このため、きれいな下水処理水にして塩素投入量を少なくする必要がある。しかし、実際にはきれいな処理水にするために、前記したようにライフサイクルエネルギー原単位に示されるように大量のエネルギーが投入されていることが分かる。水道と下水道を含めた水循環的視点でトータルとして省エネルギーを図るためには、やはり水道の原水を清浄な水質で豊かな水量を保つように流域全体で健全な水循環を保全、再生していくことが基本的な対策であることが再認識される。

3-4-3 水源及び水道に関する課題事例

(1) 福岡都市圏N市における水源及び水道の課題

① N市の水資源状況

本市域は、福岡平野の南東地域に位置し、北東から連なる三郡山地と南西から連なる脊振山地に挟まれた地域である。北流する M 川 ($\text{C.A.}=50.6\text{ km}^2$) 沿いに延びる狭長な沖積平地とその周辺に丘陵や台地が広がる。市域形状は、M 川の中流に位置し、北東～南西方向に約 9 km 、北西～南東方向に $1\sim 3\text{ km}$ と細長い。地質は、中生代白亜紀の花崗岩類を基盤岩とし、M 川や U 川沿いに層厚が最大 $20\sim 30\text{ m}$ ほどの第四紀の堆積層が分布している。

本市での都市化の進展による地下水涵養量への影響を調べた。検討代表期として高度経済成長期前の 1955 年頃、高度経済成長期の 1975 年頃、バブル経済崩壊後の 1994 年頃ならびに経済低迷期に入った 1999 年頃を選定した。なお、土地利用面積は各代表期の国土基本図 ($1/25,000$) からを計測した。

市全域に対して、各代表期の土地利用を水循環モデル⁹⁾ に適用して都市化の進展に伴う地下水涵養量の推移を調べたものが図-3.4.8 である。なお、この水循環モデルは、「流出-涵養モデル」と「地下水流動モデル」を組み合わせる新たに作成したモデルである。前者は現況の土地利用を山地、林地、水田、宅地および市街地に代表させ、それぞれの土地利用からの流出と地下水涵養特性をタンクモデルで表現したモデルである。後者は土地利用ごとに計算された地下水涵養量を

インプットデータ（土地利用区分は 50m メッシュ）とする三次元地下水解析モデルである。

土地利用の変遷をみると、1955 年頃は山地、水田、林地の自然系が市域全体の 97%を占めていた。しかし、1999 年頃には 43%と半減しており、特に水田は 2%と激減している。それに対応して、市街地と宅地が 56%を占め、この約 40 年間で急激に都市化が進展したことが分かる。

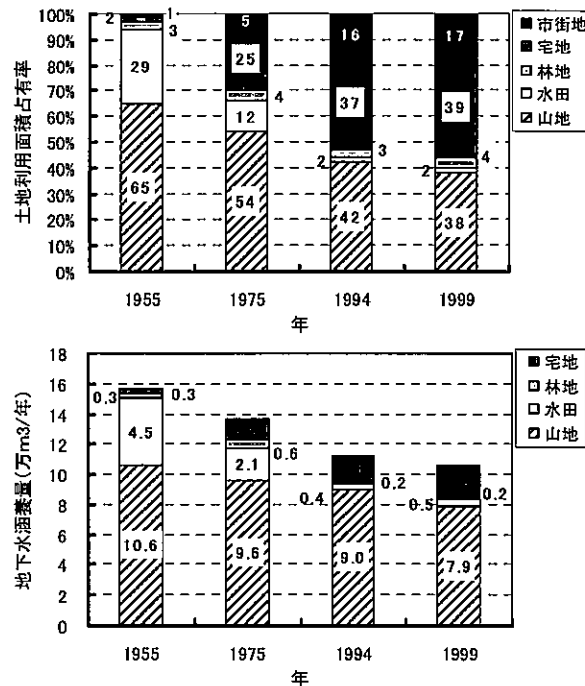


図-3.4.8 N市の都市化の進展に伴う年地下水涵養量の推移

また、地下水涵養量の推移をみると、都市化の進展に伴い、この間の年涵養量が約 32%減少したと推定される。特にベッドタウン化の過程で水田が宅地に転換されたため、水田からの年涵養量が 1955 年頃には市域全体年涵養量の約 29%あったものが、1999 年頃には約 4%に激減している。このように都市化の進展すなわち不浸透域の拡大は、地下水涵養量を急激に減少させていることが分かる。

さらに、市域内での表流水と地下水を含めた水収支状況を把握するため、市域内での有効雨量に対する河川流出量、地下水涵養量と市域外への地下水流出量などを平常年（1999 年：1710 mm/年）と渇水年（1994 年：737 mm/年）で比較した。

地下水を含めた市域全体での年間水収支の比較結果を表-3.4.8、図-3.4.9 に示す。なお、表-3.4.8 に示す水循環構成要素のうち人工系には本市の統計資料を用い、自然系には先に涵養量を求めたものと同じ水循環モデルを用いて流動量を求めた。水収支特性は以下のとおりである。⁵⁾

- イ) 平常年の水収支は、市域への流入量と市域からの流出量がほぼ同量であるが、渇水年では、流入量に比べて取水量を含めた流出量が 3,600 千 m³/年程度多い。また、渇水年の地下水取水は、市域内に貯留されている地下水の消費により補われているため、平常年とほぼ同程

度確保できている。このことは、地下水資源が渇水時の非常用水源として有用であることを示している。

ロ) 本市は北東部と南西部が山地であり、市域形状も南北に細長い。このような地形条件のため、地下水の市域外流出量は流入量の2.6倍と多く、地下水資源の利用面からは不利な条件にある。

ハ) 水道水の29%(1999年)に相当する2,526千 m^3 /年は、市域外から導水された水である。一方、不浸透域である市街地(市域全体の面積に占める割合17.4%)からの年間降雨流出量を試算すると、平常年(1999年)では8,350千 m^3 /年となる。この流出量は、市域全体からの流出量15,915千 m^3 /年の約52%を占め、市域外からの導水量の約3倍に相当する。このことは、市街地に降った本来は水資源である域外導水量の約3倍もの降水量が市域外に廃棄されていることになる。

表-3.4.8 平常年と渇水年における
N市域内水収支比較表

区分	水循環構成要素	平常年(1999年)		渇水年(1994年)	
		流動量 (千 m^3 /年)	比率 (%)	流動量 (千 m^3 /年)	比率 (%)
流入	自然降雨量	49,486	100	25,294	100
	市域内地下水流入量	2,050	4.1	1,438	5.7
	人工企業団受水量(注)	2,526	5.1	2,102	8.3
	小計	54,062		28,834	
流出	自然蒸発散量	20,230	41	15,209	60
	河川流出量	15,915	26	6,868	18
	市域外地下水流出量	5,379	11	2,048	8.1
	市域外河川取水量	3,502	7.1	(0)	0
	流域下水排出量	9,024	18	8,335	33
	小計	54,050		32,460	
水収支(流入-流出)		12		-3,626	

(注):福岡地区水道企業団が筑後川流域から導水し、浄化した水を本市が受水した量で、「福岡県の水道 平成11年度」による

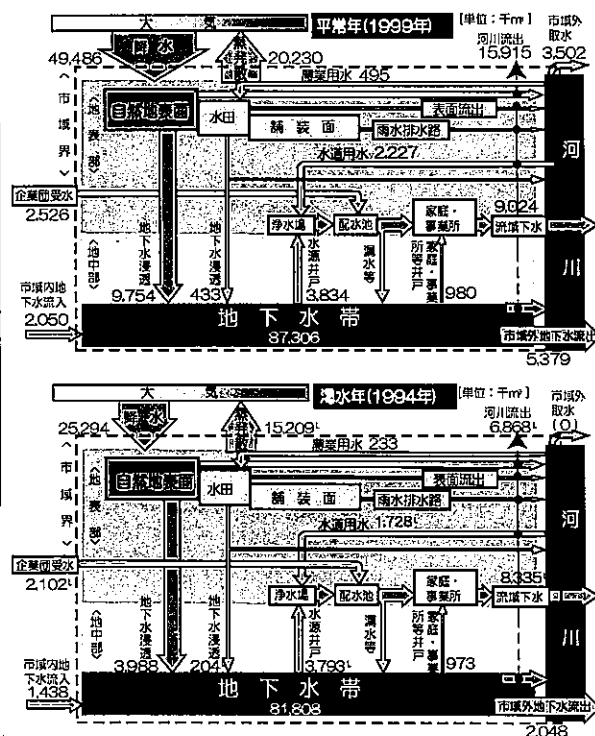


図-3.4.9 平常年と渇水年における
N市域内水収支比較図

② 水源及び水道に関わる課題

N市域の自然的制約条件や都市化域の拡大による水源涵養量の減少、さらには水需要量の急激な増大に伴う市域外水源への依存率の上昇などを踏まえて水源及び水道に関する課題を整理すると以下のとおりである。⁵⁾

a. 自己保有水源率の低下

自己保有水源率(=自己保有水源水量/全水源水量 $\times 100$)は、図-3.4.10に示すように1983年の福岡導水事業や2005年の福岡都市圏海水淡水化事業からの企業団受水開始後から低下傾向にあり、最近では60%以下まで低下している。今後さらに低下することが予想され

る。自己保有水源率が低下し過ぎると、広域導水の水源流域の水事情や受水者である福岡都市圏自治体間の競合（N市の企業団受水権 11,900m³/日は、企業団の取水権 268,100m³/日の4.4%に相当）などの影響を受け易くなる。その結果、渇水時の受水量が左右される可能性があり、水道水供給の安定確保に不確実性は依然として残る。

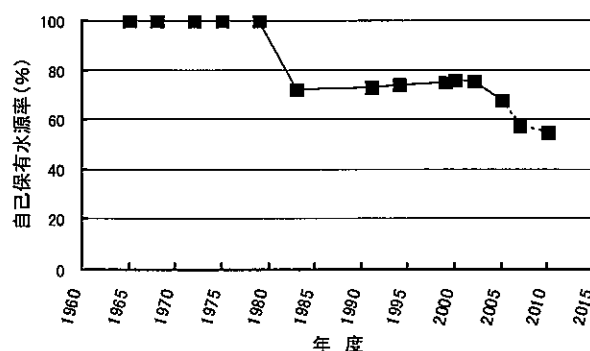


図-3.4.10 N市の自己保有水源率の推移

b. 非常用水源としての地下水

全取水量の約 45%を占める地下水は、市の水源井で取水されている。しかし、経年的な水源井の機能低下が認められるものもあり、地下水依存率の低下要因の一つにもなっている。一方、市域には活断層とされる警固断層が走っている。このため、2005 年 3 月 20 日の福岡西方沖地震のような地震災害を被る可能性は否定できない。地震や洪水災害、河川の水質汚染事故などの発生時の非常用水源としての地下水水源の確保は防災上も重要である。

c. 水需要量増への対応

本市は、1978 年の大渇水を経験して、水需要抑制策として「水道事業給水要綱」を作成し、1982 年から 51 戸以上の大規模集合住宅への給水制限を実施した。しかし、近隣自治体における「給水拒否訴訟」¹⁰⁾ の判決を受けて、水道法に定める行政としての市民への水道給水義務の実現と水資源開発施策の推進に取り組んできた。その結果、1998 年 4 月から大規模集合住宅には、節水設備を設けることを条件として給水制限が撤廃された経緯がある。福岡都市圏にあって地理的好条件に恵まれていることから、将来的にも人口増加が見込まれる。水需要量もさらに増大する可能性もある。このため、節水への継続的な取り組みと併せて水需要量の抑制策も重要である。しかし一方では、水道使用量の減少による水道会計の逼迫問題があり、水道施設の維持管理コストのさらなる削減が求められている。

d. 水道用水原水の水質保全

河川水の BOD は、下水道整備の進捗とともに改善されてきている。しかし、市域の上流にある U ダム貯水池では、藻臭防止策の一環として、2005 年に間欠曝気設備が増設されるなど、対策が必要な状況にある。水道用水の原水として良好な河川水質を今後も維持・改善していくことが水道水のコスト維持の観点からも重要である。

(2) 水道水源を地下水に依存する熊本市の課題

① 熊本地域の地質と水循環機構

熊本地域は、阿蘇外輪山から連なる面積約 1,000km²の熊本市を含む 14 市町村から構成された地域で、約 100 万人が暮らし、上水道のほぼ 100%を地下水で賄っている。

熊本地域の地下水の涵養域は、阿蘇外輪山西麓域の合志町、大津町、菊陽町にかけての菊池台地、植木台地から白川中流域、高遊原台地にまたがる広大な地域である。この地域には約 27 万年前から約 9 万年前までに阿蘇火山の 4 回にわたる大規模な噴火によって噴出された透水性の高い阿蘇火砕流堆積物（Aso-1～4）が厚く堆積しており、図-3.4.11 に示すように熊本地域の水循環機構の中で主要な地下水帯水層の役割を果たしている。これらの涵養域に降った雨は、地下水となり阿蘇火砕流堆積物中を地形に沿って流れ、熊本市南東部地下にある砥川溶岩と呼ばれる多孔質で割れ目が発達した溶岩に一旦蓄えられ、託麻台地周縁部に位置する多くの湧水地から湧出した後、再び河川水（緑川）に戻る。

熊本地域地下水総合調査（平成 7 年 3 月 熊本県・熊本市）によると、熊本地域の地下水涵養量は年間約 7 億 m³と見積もられているが、土地利用別では、台地部の水田 46%、畑・草地など 41%、山地が 13%と推定されている。特に白川中流域の水田は、約 1,500ha の面積であるが、年間約 1.5 億 m³を涵養しており、熊本市の水道の年間給水量 0.81 億 m³を上回っている。このように水田や畑地などの農地が地下水涵養に大きな役割を果たしている。

水田開発は 1588 年に肥後入国した加藤清正による白川中流域の水田開発事業に始まる。白川から灌漑取水して台地上の水田に導水するための多くの井手を開削した。これにより、河川水→灌漑水→地下水への転化という人為的な水循環系をつくり出した。すなわち、熊本地域に本来あった阿蘇火砕流堆積物という自然的水循環系に約 400 年前の水田開発による人為的水循環系が絶妙に組み合わさって、豊かな地下水に恵まれた現在の水循環システムをつくり上げていると言える。

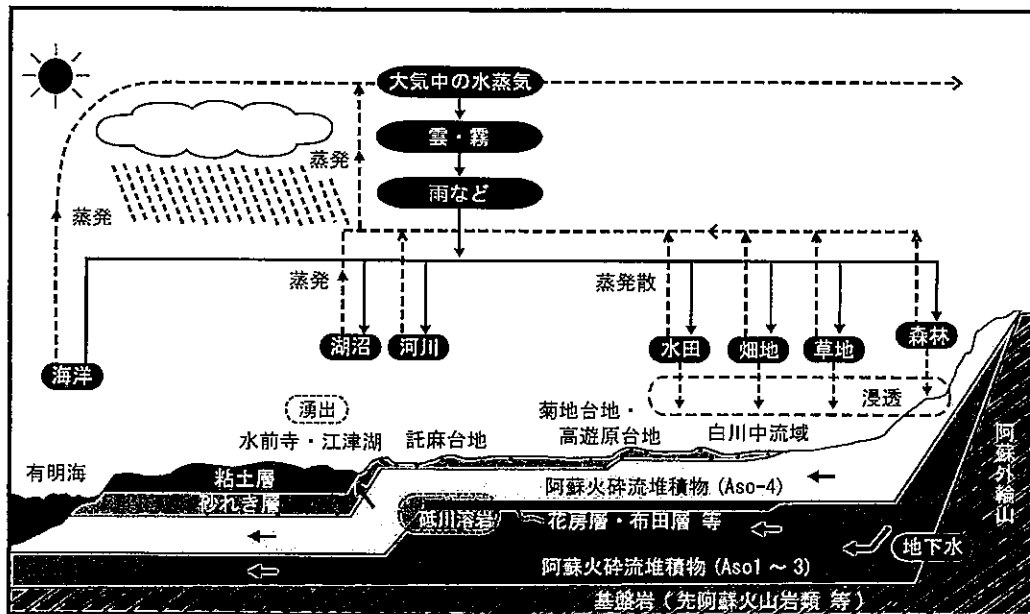


図-3.4.11 熊本地域の水循環機構概念図（出典：「熊本の地下水」に加筆）

果樹園、森林、草地が 93.8%から 86.7%へ 7.1%減少している。水田面積自体はあまり減少していないが、実際に水張りして稲作する水田は大きく減少している。

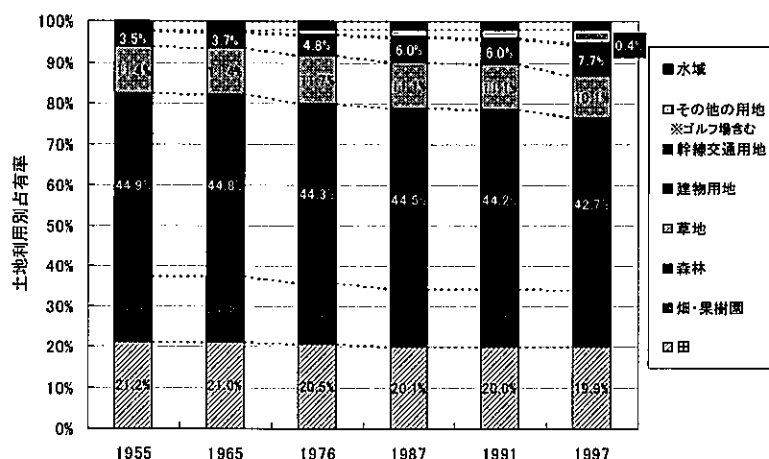


図-3.4.13 熊本地域拡大流域圏における土地利用の変遷

熊本地域拡大流域圏での減反率は、1970 年の減反政策開始以来、ほぼ一律に上昇している。1985 年で約 20%、2000 年では地域によりバラつきが見られるが概ね 20~40%となっている。白川中流域（立野～代継橋地点）に着目して、減反により水張りしていない水田面積を考慮すると、図-3.4.14 に示すように実際に稲作している水田面積は、1955 年に 19,800 千 m^2 であったが 1997 年では 10,900 千 m^2 と 45%も減少している。

白川流域の水循環機構としては、阿蘇カルデラ域からの流出（地下水+河川水）は、立野火口瀬で一旦、白川河川水として阿蘇外輪山西麓域へ出て熊本平野を西方に流下する。その途中の白川中流域の天津町・菊陽町に位置する畑井手堰、上井手堰、下井手堰、迫・玉岡堰、津久礼堰、馬場楠堰などの主な 7 つの農業用水取水堰から取水され左右岸の水田に灌漑補給されている。これが灌漑水を介して河川水から地下水への転化システムである。しかし、稲作の減反政策により休耕水田や転作水田が増加して、水張りしない水田面積が増加してきた結果、図-3.4.14 に示すように白川下流の代継橋の流況が豊になってきている。

一般的には、都市化が進むと上流での河川水利用率が上昇して下流の流況は低下する。白川では逆の現象が生じている。これは白川中流域の灌漑取水量規模が元々大きく（ザル田）、そのため水張りしない水田が増加した影響が大きく表れたことによる。すなわち、灌漑取水量は取水堰で一旦取水されるが、余剰分は井手（用水路）始端の余水吐きから再び本川へ戻されるためである。

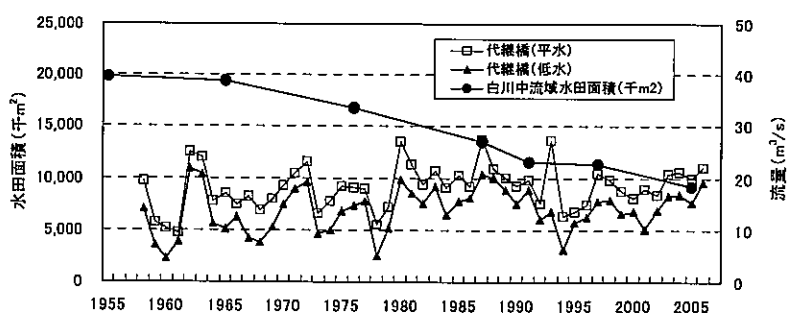


図-3.4.14 水張り水田面積と白川下流代継橋流況の経年変化

② 地下水に関する課題

a. 地下水位の低下と湧水量の減少

熊本市は1977年に「熊本市地下水保全条例」を制定し、地下水採取者に対して自噴井戸で吐出口の断面積が 19 cm^2 を超えた取水管を設置した場合には、市への届け出と毎年の地下水採取量報告義務を課している。それにも拘わらず、図-3.4.15に示すように菊池川左岸の合志川流域から白川および緑川流域まで広域的に地下水位が低下傾向にある。また、江津湖の湧水量も図-3.4.16に示すように同様に減少傾向を示している。

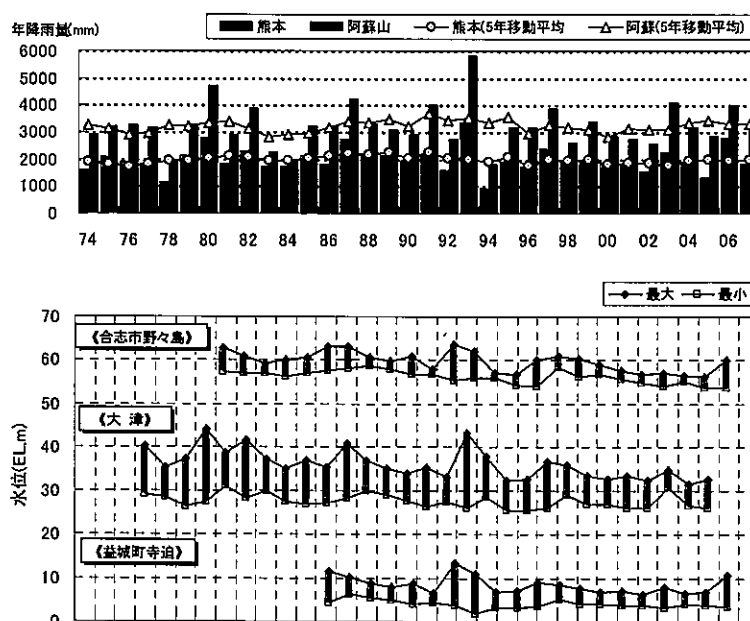


図-3.4.15 地下水位の変動傾向

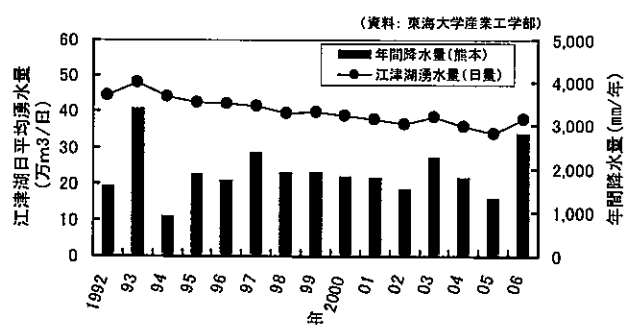


図-3.4.16 江津湖湧水量の変動傾向

また、熊本県・熊本市は1996年に「熊本地域地下水総合保全管理計画」策定に際して、これまでの地下水調査成果に基づいて、熊本地域での地下水涵養量の推算や地下水の収支バランスを検討している。その上で地下水位の低下原因を水田の非水張り面積の増大や阿蘇外輪山西麓域への都市化の拡大による地下水涵養量の減少と地下水採取量の増大であるとした。

広域的な地下水低下メカニズムについては、下津の研究¹¹⁾や国土交通省の調査¹²⁾がある。各流域の流量観測地点における水収支の経年変化分析の結果、白川中流域の水田からの地下水涵養量が1980年頃から減少傾向にある。そのため、上流域の合志川流域の地下水が白川中流域からの地下水涵養量減少分を補う形で地下水供給量を増やしているが不足分を十分に賄えていない。このため、菊池川流域（主に合志川流域）、白川流域とも地下水貯留量そのものを消費させ、すなわち広域的に地下水位を低下させつつあると考察している。

このための主な対策として、浸透能が大きい白川中流域の休耕田、転作水田への水田湛水による涵養量の増強と地下水採取量の抑制を進めている。その結果、目標年間涵養量2,000万 m^3 （熊本地域地下水総合保全管理計画 平成8年）に対して2006年度では1,170万 m^3 程度（実施延べ面積390ha）を達成している。¹³⁾ また、上流域での水源涵養林整備事業も進められている。

b. 硝酸性窒素汚染

広域地下水である第2地下水の湧水地である水前寺や江津湖周辺にある熊本市観測井戸の地下水水質調査の結果、図-3.4.17に示すように硝酸性窒素濃度が長期的に見れば上昇傾向にある。¹⁴⁾ 熊本市北西部での硝酸性窒素濃度の高い地域は、みかんなどの果樹栽培やスイカ・メロンなどのハウス栽培の施肥が主な原因とみられる。第2地下水も第1地下水と同様に濃度が上昇していることから、第2地下水の流れに当たる市東部や江津湖付近の地下水にも硝酸性窒素濃度の上昇傾向が見られるようになったと考えられる。¹⁵⁾ 硝酸性窒素の濃度は、地下水量（水位）が減ると濃度が高くなる傾向があるため、地下水質の問題は地下水量の問題とも密接に関係している。

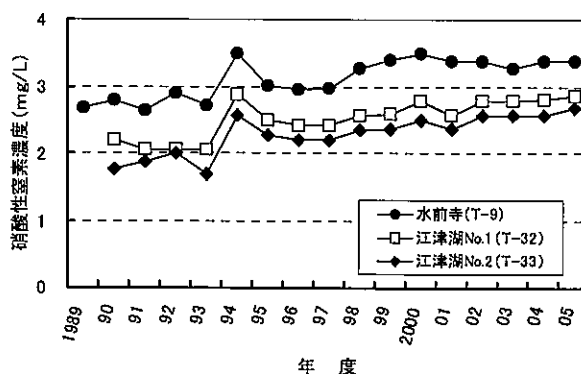


図-3.4.17 代表的な熊本市観測井戸の硝酸性窒素濃度の変化

水田湛水事業は、熊本市が2004年1月に大津町、菊陽町、地元土地改良区などと「白川中流域における水田湛水推進に関する協定」を締結して開始された。本事業は主に大豆やにんじんを作付けする前の1～3ヶ月の間に水を張ってもらって水張りの面積や期間に応じて助成金を交付するものである。事業のしくみは、まず、大津町などの協定締結自治体と土地改良区などで構成する「水循環型農業推進協議会」が農家に対して転作水田での湛水の普及と指導を行う。協力農家は協議会に湛水の申請を行うと熊本市から表-3.4.9に示すような湛水面積と期間に応じて助成金が交付されるようになっている。

表-3.4.9 水田湛水助成金

湛 水 期 間	助成金 (10a あたり)
1ヶ月(最低25日以上)の湛水	11,000 円
2ヶ月(最低55日以上)の湛水	16,500 円
3ヶ月(最低85日以上)の湛水	22,000 円

最近の調査では、水張りにより、1)連作障害の抑制、2)土壌病虫（線虫）の防除、3)ミネラルに富む白川河川水の水張りによって土壌中にミネラル（Mg, Ca, K）が増加したことが報告されている。¹³⁾ このため、水田の水張りによる減農薬・減化学肥料を図る環境保全型農業として期待される。また、環境保全や熊本地域の健全な水循環の再生と農作物の品質、作物収量の向上による地域経済の活性化を両立させ、環境と経済の好循環を実現させる地域での新しい社会実験として興味深い取り組みである。

参考文献

3-4 節

- 1) 植田敦：弱者のための「エントロピー経済学」入門，ほたる出版，2009.9
- 2) 村瀬誠：環境シグナル，北斗出版，1996.4
- 3) 水道と地球環境を考える研究会：地球環境時代の水道，技報堂出版，1993.7
- 4) 厚生労働省健康局：水道ビジョン（改訂版），2008.7
- 5) 高橋研・才田進・神野健二：福岡都市圏自治体における水資源に関する課題と水収支評価による対策検討事例，水道協会雑誌，第869号，平成19年2月
- 6) 西日本新聞記事：「井戸水ブーム」，平成16年7月9日
- 7) 吉本秀行監修：大都市生活のライフサイクルエネルギー，社団法人資源協会，平成11年1月
- 8) ソーラーシステム研究グループ・押田勇雄編：NHK ブックスNo428 都市の水循環，日本放送出版協会，1982.12
- 9) 才田進・高橋研・神野健二・濱里学・下大迫博志：水循環解析による都市化域での水資源賦存量評価，水工学論文集，第50巻，2006.2.
- 10) 神野健二：福岡県志免町の給水拒否裁判と給水規制要綱について，土木学会誌，Vol.85, No.12, p.28-29, 2000.
- 11) 下津昌司：火山性地質地域における水循環機構とその特性に関する基礎的研究，学位論文，昭和61年1月
- 12) 建設省 九州地方建設局 熊本工事事務所：平成11年度 熊本地域水循環検討業務報告書 平成12年3月
- 13) 豊かな地下水を育むネットワーク・エコパートナーくまもと水と緑 WG：ザル田通信，第2号，2008.6
- 14) 熊本市：第1次熊本市硝酸性窒素削減計画，平成19年8月
- 15) 津留靖尚・赤星博興・宮本裕美：熊本市における地下水中の硝酸性窒素について，平成18年度，熊本市環境総合研究所報