

大都市の水循環構造と資源配分に関する研究

～中国北京市を例として～

A Study on Water Cycle Structure and Resources Allocation of Metropolis

～As a Case Study of Beijing City～

網屋 香¹

森杉雅史¹

井村秀文¹

Kaori AMIYA

Masafumi MORISUGI

Hidefumi IMURA

ABSTRACT : Recently, the population of Beijing has increased with a decrease in the center city and an increase in the suburban and rural area within the city. Beijing is located near Hai He in northern east of China, which is 150km inland from east Bohai, and the capability of contaminant purification is low. There is a maintenance plan of sewage for the center and the suburban area but not for the rural are of the city. While the population increase in the rural area is expected, there is an urgent need for drainage maintenance to prevent the contamination of ground water for agricultural use. Therefore, wastewater disposal plants were studied in respect of their cost effectiveness in each area. With a proper wastewater disposal, the groundwater contamination will be prevented. In addition, water supply with recycling water could be an effective solution to compensate the water shortage in Beijing.

KEYWORD ; Wastewater Disposal Plants, Drainage, Water Resource, Beijing

1 はじめに

国連の発表によると現在, 世界で 10 億人以上が安全な水を飲むことができず, 年間 300 万人以上が汚染された水によって引き起こされる病気で亡くなっている。人類にとって安全な水を十分に確保することは大命題である。中国の秦嶺山脈から淮河を結ぶ線以北は乾燥地帯であり, 北京の降水量は年間 600mm と絶対的に少ない。

また北京市を流れる平均表流水は年間 23 億 m³, 北京市外部からの平均流入量は 20.5 億 m³ で

表-1 北京市の人口変動 (10000人)

	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年
北京市全体	1061.8	1170.3	1077.7	1085.5	1093.5	1099.8	1107.5
城区	243.6	243.6	243.7	244.6	240.9	239.5	238.2
近郊区	381.5	388.2	395	401.6	410.9	419.4	429.2
遠郊区	99	99	98.7	98.3	157.5	253.9	253.9
各县	337.7	339.5	340.3	341	282.2	187	186.2

あるが, 近年の北京市上流部における都市の著しい経済発展により流入量は年々低下している。北京市は 2000 年の

表-2 北京市の人口増減数 (人)

	1994年	1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年
自然増加	21976	22880	11567	9050	-8355	1159	-5419
機会増加	86498	62908	60031	63206	57609	68845	89109
純増加	108474	85788	71598	72256	49254	70004	83690

時点で 1107.5 万人 (全市常住人口) と大規模な人口を擁している。この人口の内訳を見てみると, 表-1 のように北京市全体では最近 7 年間で増加していることが分かる。城区においては僅かながら減少の傾向が見られるが, 近郊区・遠郊区に関しては増加していることが分かる。それとは逆に遠郊区の北側 (延慶県・懷柔県・蜜雲県・平谷県), 南側 (大興県) の各县 (図-4) の人口は減少している。これらより,

¹ 名古屋大学大学院環境学研究科 Graduate School of Environment, Nagoya University

城区と各県から近郊区・遠郊区に人口が流入していることが読み取れる。また表-2 より、一人っ子政策により人口の自然増加は抑えられてきているものの機会増加人口は未だに増えており、職を求めて大都市への人口移動が行われ、都市化している事が分かる。このように人口規模が大きいにも係らず、水源への降水量が少なく、水を供給する河川の規模も小さい地域では、水不足が発生することは必然であり、現に北京市は慢性的な水不足に陥っており、地下水の過剰摂取による地盤沈下も報告されている。また、貴重な水資源が使用された後の排水の量も膨大である。図-1 から人口の伸びに比べ排水量の伸びが大きくなっていることが読み取れるが、北京市内の污水处理率は2000年の時点で39.4%と依然として低く、未処理で放流された排水が環境に大きな負荷を与えている。しかし渤海から150km内陸に入り込んでいる北京市の地形では自然浄化はあまり期待できない。以上のことより今後の迅速な下水処理施設の普及が切望される。中国建設部においても全ての都市に対して2005年までの下水処理施設建設と下水処理率45%の達成を義務付け、2010年までには下水処理施設の普及率90%、下水処理率60%を達成しなければならないとしており、水資源プロジェクトの外国企業の参加を歓迎している。そこで今回、北京市の下水処理施設の最適配分に注目し、地下水・河川水への環境負荷の通減と、再生水利用の促進による水道水の使用量を減少を促し、水需給の逼迫における需給ギャップの緩和に寄与することを目的に研究を行った。

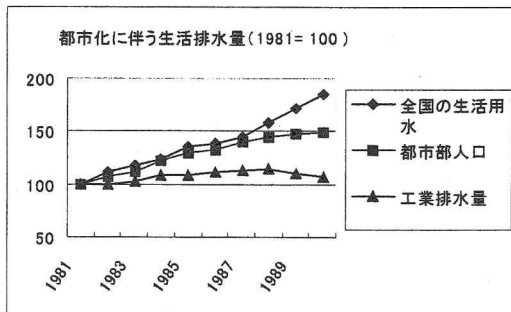


図-1 都市化に伴う生活排水量

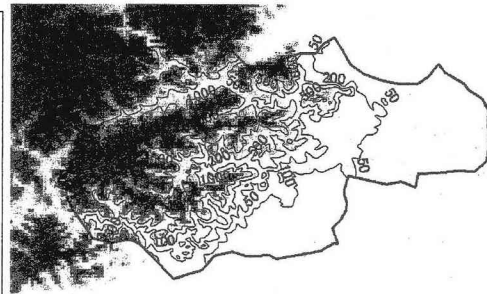


図-2 北京市内等高線図

2 下水処理施設の特徴

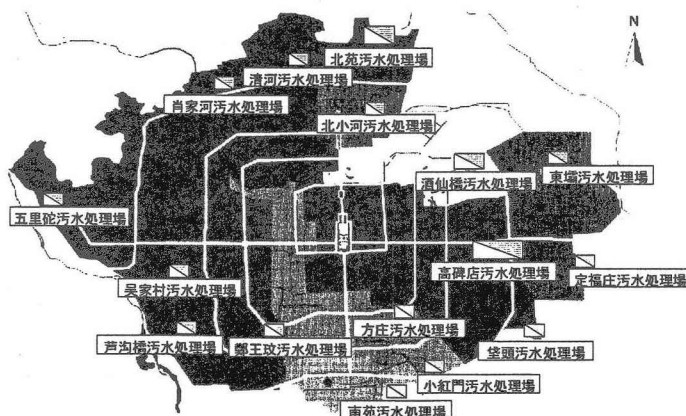


図-3 北京市城近郊区における下水処理

北京市における下水処理場は現在4つ(高碑店污水处理場・北小河污水处理場・酒仙橋污染处理場・方庄污水处理場)あり、4つ合わせた処理場の処理能力は128.5万t/日である。これら4つは、全て対象区の比較的低層な南東側に位置している(図-2、図-3)。これは自然勾配を利用して下水管にポンプを敷設する必要を無くすためであると思われる。4つの処理場の中で一番大きい高碑店污水处理場は、以下の処理を行えるように水質設計されて

表-3 高碑店污水处理場の下水処理水質概要

表-4 名古屋市の下水処理場の下水処理水質概要

ここで日本の下水処理場と比較する。表-4の表は名古屋市の下水処理場の平均値である。表-3、表-4から分かるように、両者の間には水質改善に関してそれほど大きな差はない。

を開始した。高碑店污水处理場二期工事に他に北京市では 2001 年に清河污水处理場、吳家村污水处理場、盧溝橋污水处理場、小紅門污水处理場など 6 つの污水处理場と付属施設の建設が始まり、5 年後に稼動される計画が立てられている。その時点で北京市の污水处理能力は 264 万 t/日に達する予定である。この結果、北京市城区・近郊区の污水处理率は高まり、污水处理場で再生された再生水を送るパイプは次第に各家庭にも伸び、水洗トイレの洗浄に使われるとの水資源の循環利用シナリオが準備されている。

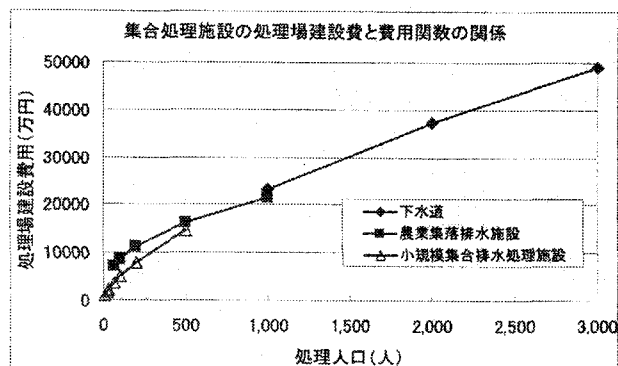
单 位	2000-全体	2000-城近郊区	1999-全体	1999-城近郊区	1998-全体	1998-城近郊区	
下水道距離	km	4846.9	4146.1	4737.1	4067.2	4645.6	3898.9
雨水管	km	1477.7	1342.7	1391	1273.8	1346.5	1222.9
污水管	km	1852.1	1691.2	1753.7	1631.9	1712.4	1557.1
雨污合流管	km	1517.1	1112.2	1592.4	1161.5	1586.7	1118.9
处理場	基	4	4	4	4	4	4
处理能力	万t/日	128.5	128.5	58.5	58.5	58.5	5805
处理量	万t	37031.1	35094.8	25110.5	23725	22702	21170
处理率	%	39.4	39.4	25	25	22.5	22.5
一日平均污水量	万t	257.5	244.3	278.8	260	276.4	258.2

北京市は深刻な水不足に直面しているため、水資源の再利用が進められている。高碑店污水处理場では、再生水を隣接する石炭火力発電所に冷却水として3万t/日供給している。高碑店で処理再生される残りの47万tの再生水は毎日、北京市内へパイプを通して供給される。その用途としては洗車用水、修景水、工業用冷却水、道路の清掃などである。わが国では1998年において下水処理場における処理水量は年間129億 m^3 、そのうち再生水として利用されている量は1.3億 m^3 と、僅か1%に過ぎない。その内訳は再生水の環境用水(48.5%)が最も多く、次いで農業用水(12.0%)に使われている。これらのことから、水不足に苦しむ北京の処理水再利用への努力が伺える。



1 でも述べたように近年、近郊区・遠郊区の人口が増加傾向にある。また近郊区・遠郊区は地価の高い城区を避けて企業の工場が建設される場でもある。これらの地域が今後発展し、生活排水・工業排水

ともに量が増加し、水質も悪化することが予想される。現在、北京市では2で述べた通り、城区・近郊区における下水道事業に力を入れているが、その周囲の遠郊区・各県については施設整備計画にも着手されていない。北京市における耕地面積の割合は約20%であり、従来、農業灌漑用水として使用されてきた地下水が、今後の生活排水や工業排水により一度汚染されると、浄化能力が小さいために何年にもわたり農業灌漑用水が汚染され、農作物に多大なる影響が出るのが予想される。当然ながら、今後郊外部においても水質環境基準規制の影響を受け、単独・合併処理浄化槽等の整備が進んでいくものと思われる。近年わが国では合併処理浄化槽と下水道の処理水質にあまり差がないことが多く報告され、浄化槽のBOD除去率については単独が65%に対して、合併では90%にも及んでおり、実績データからも規制基準である20mg/lを軒並クリアしている。しかし、生活排水などの再利用には、用途にもよるが、高度処理など現代中国においては未だ別格の技術を望まないとしても、浄化槽等の設備に付帯できうる施設では不十分にしか供給はできない。従って、北京市には居住地の郊外化が進行していることや、今後の再生水の用途先の一つとして農業灌漑用水が挙げられることから、下水道施設ないし農業集落排水施設を郊外に展開し、整備していくことが急務である。一方、日本でも平成元年において、総務庁行政監察局が建設省（現国土交通省）、農林水産省、厚生省（当時、現在は環境省が担当）に対して「下水道等に関する行政監察」に基づいて勧告が行われ、当時最も問題となっていた下水道処理場とその類似施設である農業集落排水や合併浄化槽との配分調整について各省による答申が求められている。北京市においても今後10年間以内に同様な問題が浮上することが予想され、長期的な動向も見越した両設備の各地域における適切な配分基準を設定する必要がある。本章ではこれを試算して吟味する。各省の見出す数値にはやや固有差があるが、ここでは環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部から平成14年3月に提出されている「生活排水処理施設整備計画策定マニュアル」を参考にすることとする。具体的には、行政区分として図-4にあるように城区・近郊区・遠郊区・各県を総じて18区分で取り上げ、北京統計年鑑（2001）より社会経済指標データを抽出し、データの不備のため下水道・合併浄化槽についての処理場施設・管渠整備及び意地管理費用については同マニュアルからの値を抜粋し、各区ごとに下水道設備からと下水処理施設の種類の検討を行う。



以下の指数関数形で近似される。

図-5 各排水処理施設の処理人口-建設費用の関係

$$\text{処理場整備費用（万円）} = 224.3 \times (\text{P：処理人口（人）})^{0.6707}$$

施設耐久年数は処理場土木建築物60年、処理場電気設備23年、管渠60年として、内前2者についての費用内訳比率を1:1としている。小規模処理場施設の管渠m単価敷設費用は6.2万円、維持管理費用は24円とされ、小規模処理場施設の維持管理費については同様な回帰によって $1.97 \times P^{0.845}$ 万円と見積

まず下水道・農業集落排水施設・小規模集合排水処理施設を指す集合処理施設については、図-5のように、同マニュアルでは平成10年自治省による公営企業年鑑をもとに集合処理施設の処理場建設費と対象処理人口の関係を下水道・農業集落排水施設、小規模集合排水処理について費用関数を推定している。その結果は、対象人口規模区分と各施設に対する規模の経済の働き方に若干の違いは見られるものの、概ね

もられている。比較対象では、ここでは個別処理施設として合併処理浄化槽のみ取り上げる。躯体、機器設備や維持管理費用については同省浄化槽対策室による調査の結果、平均値として整備費について5人槽1箇所当り88.8万円（本体費用、設置工事費用、付属機器設備類費用の比は55:40:5、内前2者の耐久年数は30年、末尾は10年）、維持管理費にして6.5万円と見積もられている。ここで、L=管渠距離、H=平均世帯人員数とおくと、処理対象計画人口Pを集合処理ないしは個別処理（5人用合併処理浄化槽）で汚水処理される場合、それぞれの総費用は次の様に求められる。

集合処理の単年度あたりのコスト

$$(224.3 \times P^{0.6707} / 60 \text{ 年}) \times 0.5 + (224.3 \times P^{0.6707} / 23 \text{ 年}) \times 0.5 + (6.2 \times L / 60 \text{ 年}) + 1.97 \times P^{0.845} + 0.0024 \times L \quad (4.1 \text{ 式})$$

個別処理の単年度当たりのコスト

$$(88.8 / 30 \text{ 年}) \times (P / H) \times 0.95 + (88.8 / 10 \text{ 年}) \times (P / H) \times 0.05 + 6.5 \times (P / H) \quad (4.2 \text{ 式})$$

ここで、北京市各区について北京統計年鑑 2001 より平均世帯当り行政区域面積（SB）と平均世帯当り住宅地面積（SA）が伺えるが、実質的な人口並びに家屋の空間分布状況詳細については情報入手できない。そこで、本研究では全ての世帯が一戸建てを持ち、行政区域面積に相当する、あるいは住宅地面積に相当する、一塊の各地区閉集合エリアに均一に家屋が立ち並ぶと想定する。現実的には勿論妥当しないが、最も下水道整備計画を立てる上で困難な状況を設定することによって、その限界を知ることができる。計画対象人口は下水道計画者が任意に設定できるものとする。1施設当りが対象とする処理世帯は連続になるよう線引きされ、SA及びSBに対応する正方形を敷地として持つ。この時、家屋間距離は正方形の1辺に相当する。計画人口にn世帯存在するとすれば、延長すべき下水管渠延長距離は1辺の長さ×(n-1)と算定され、これをそれぞれA、Bとおく。

表-6 計算結果

計画処理人口 (P)	60 L-A	60 L-B	300 L-A	300 L-B	1000 L-A	1000 L-B	5000 L-A	5000 L-B
合計	-52.31	-933.55	2349.68	-4590.51	12284.09	-11001.55	81881.43	-34806.75
城区	365.91	241.60	4512.99	3422.21	19537.24	15878.04	118219.40	99883.55
東城区	401.62	271.11	4691.07	3546.72	20130.55	16292.16	121185.50	101952.51
西城区	325.37	199.31	4309.72	3202.77	18859.34	15145.45	114829.35	96218.61
崇文区	428.39	298.59	4825.23	3687.62	20577.94	16762.41	123422.74	104304.85
宣武区	337.05	226.82	4370.24	3402.30	19062.29	15814.79	115846.23	99572.65
近郊区	138.57	-209.85	3345.14	283.62	15626.25	5353.48	98633.33	47153.45
朝阳区	231.34	-133.26	3809.41	612.05	17174.04	6449.06	106372.69	52632.73
丰台区	249.56	-153.96	3896.67	360.87	17462.66	5604.04	107811.92	48394.31
石景山区	115.54	-196.52	3233.82	489.03	15257.40	6045.87	96792.92	50628.58
海淀区	-0.03	-311.92	2653.05	-97.43	13319.79	4085.15	87101.94	40814.90
遠郊区	-110.51	-1321.50	2045.25	-6984.55	11261.48	-19033.67	76754.99	-75056.50
門頭溝区	-253.51	-2134.81	1285.31	-12704.94	8702.15	-38214.25	63913.36	-171152.42
房山区	-189.02	-1358.98	1650.95	-7090.18	9946.12	-19390.23	70176.42	-76846.91
通州区	141.79	-807.74	3334.17	-3728.28	15573.85	-8110.82	98344.24	-20324.61
順義区	-131.92	-1123.04	1951.24	-5457.03	10955.74	-13909.24	75239.32	-49378.27
昌平区	-153.55	-1554.84	1816.44	-8624.38	10490.85	-24533.88	72888.22	-102615.95
各県	-131.75	-1986.66	1941.21	-10322.62	10915.94	-30235.57	75029.46	-131194.51
大興県	-87.35	-1205.67	2197.35	-5222.16	11789.66	-13121.00	79432.19	-45427.96
平谷県	-124.82	-1482.50	1997.23	-7004.38	11115.16	-19104.06	76046.88	-75415.77
懷柔県	-193.46	-2965.60	1596.97	-16667.52	9747.67	-51503.44	69152.39	-237736.49
密雲県	-80.80	-2146.88	2190.70	-11440.84	11744.53	-33980.36	79167.12	-149948.32
延慶県	-135.35	-2517.75	1903.80	-13805.87	10779.90	-41910.75	74329.82	-189680.73

A=住宅地のみ
B=土地全部

さらに、4.1 と 4.2 式を任意の計画処理人口の元で等号成立するものとする、(集合処理の単年度あたりのコスト)=(個別処理の単年度あたりのコスト)として、下水道施設の内、最大許容管渠総延長距離

(L) が算出される。すなわち、対象となる家屋を結ぶ際に必要な管渠の総延長距離が、この値を凌駕する場合には、対象地域の汚水処理としては合併処理浄化槽の方が望ましい。ここでは対象人口区分を 60 人、300 人、1000 人、5000 人として計算を行い、それらを比較した結果を表-6 に示す。

上記表の計算結果より、計画処理人口が増加するにつれて L の値も大きくなり、個別処理から集合処理へのシフトが促されている。これについては、対象地域が行政区画面積(SB)、平均世帯当たり住宅地面積 (SA) いずれにしても同様な傾向が見られる。また、対象地域面積を SA とした場合、住宅地は密集しているものと仮定されており、住宅地自身はまばらに配置される B を使って計算した場合よりも、対象となる家屋を結ぶ際に必要な管渠の総延長距離は当然短くなり、表の値が正、すなわち、集合処理の方が有利になる地域が多くなる。具体的には、計画処理人口が 60 人の場合、城区と海淀区を除いた近郊区において集合処理が有利になるが、計画処理人口を 300 人にした時点で北京市全域において集合処理を行ったほうが有利になることが示された。対象地域を SB にした場合は、対象となる家屋を結ぶ際に必要な管渠の総延長距離が長くなるため、計画処理人口を 60 人とした場合では城区だけが集合処理の有利地域となり、300 人以上では近郊区まで集合処理が有利となる範囲が広がっている。計算式には北京統計年鑑 2001 より、2000 年の値を用いたが、1 で述べたように近年、近郊区・遠郊区では未だに人口が増加しており、汚水処理設備の整備必要性は高まってきている。中心的下水道施設から比較的離れた地域においては、小規模な計画処理人口規模の排水処理施設を整備することが現実的である。従って、近郊区までは人口密度がかなりまばらな状態であっても下水道施設の導入は意義があることが伺える。対して、遠郊区、県については各家屋が密集した状態になれば導入可能性の意義は薄く、個別処理がふさわしいケースが多い。

5 今後の課題

本研究の課題としては、上記の住宅分布状況情報の入手の他に、各地域の水質が結果に与える影響が挙げられる。すなわち、集合処理と個別処理では処理水の水質や処理率が異なるため、環境に与えるインパクトも評価される対象となる。また、水が豊富なわが国と違い、水不足であるこの地域において処理水を再生水として再利用する意義は大きい。この際、再生水を供給する管渠の整備費用や再生水の料金などを将来的に発生する機会費用として、計算式に盛り込む必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 北京統計年鑑 2001, 中国統計出版社
- 2) 北京統計年鑑 2000, 中国統計出版社
- 3) 北京統計年鑑 1999, 中国統計出版社
- 4) 北京統計年鑑 1998, 中国統計出版社
- 5) 北京統計年鑑 1997, 中国統計出版社
- 6) 北京統計年鑑 1996, 中国統計出版社
- 7) <http://www.nikko-company.co.jp>
- 8) 北京市高碑店汚水処理場パンフレット
- 9) 平成 11 年度版 下水道統計 (名古屋市)
- 10) 中国地図のホームページアドレス
- 11) 生活排水処理施設整備計画策定マニュアル, 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部, 2002.
- 12) 小島麗逸: 大陸中国—環境学栄えて環境滅ぶ— <http://www.glocomnet.or.jp/crieipi/026/026.main.html>
- 13) 武田育郎: 水と水質環境の基礎知識, オーム社出版局, 2001.