送配水システムのライフサイクルアセスメント における社会的割引率に関する一考察

長谷川 高平¹・荒井 康裕²・小泉 明²

¹学生会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail: hasegawa-kouhei@ed.tmu.ac.jp

²正会員 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

近年、送配水システムの資産管理をより合理化するためにライフサイクルアセスメント (LCA) の概念を応用したシステム最適化が行われる事例が増えてきたが、その結果を大きく左右する社会的割引率 (SDR) の在り方についてこれまで十分な議論がなされてこなかった。そこで本研究は、SDR 見直しの方向性を確立するとともに今後の関連研究が解決すべき課題を明らかにすることを目的に既往研究の現在価値化の適用事例及び理論の整理と送水システムを対象とした LCA への SDR の感度分析を行った。事例整理と感度分析を通して、(1) 実勢の利回り及び対象国債の償還年限と現行の SDR の乖離、(2) 温室効果ガス排出への減価償却の適用は不適切である、(3) 相対的に高い SDR の維持による将来世代との不公平の拡大、の 3 点を指摘した。また、今後の SDR の見直しの方向性として対象とする国債の償還年限の長期化とともに 40 年以上の SDR には通減型 SDR の概念を適用することを提案した。

Key Words: *life cycle assessment, life cycle cost, carbon footprint, water distribution system, declining population, social discount rate*

1. はじめに

近年、日本の水道事業体の多くが人口減少と節水意識の向上による水需要減少に伴う問題に直面している。これに伴い、給水収益の減少という経営面での問題は勿論、施設効率の低下や管内流速の低下による残留塩素濃度の低下という新たな課題が浮き彫りになっている。一方、橋梁やトンネルのようなインフラ施設と同様に施設の老朽化という問題にも直面している。つまり、人口減少による給水収益の減少の一方で老朽化する施設への再投資が求められる厳しい状態にあるということになる。

これらの新たな問題に対処するため、多くの事業体ではアセットマネジメント (AM) として施設の老朽化や年度予算を考慮した上で合理的な投資計画を策定し、その計画の中で水需要の減少に合わせた施設のダウンサイジングを推進することで管路更新費用やポンプ運転費用の削減を図っている^{1), 2)}。中でも、水道資産額全体の約 7 割³⁾を占めるとされる管路の AM 及びダウンサイジングの理論を確立することは事業体の持続性に大きく関わる非常に重要な分野であると言える。初期投資 (管路布設費) に相当

する管路口径を大きくとれば、管路摩擦損失が減少することでポンプ運転費も小さくなるが、逆に初期投資を削減するために管路口径を小さくとれば管路摩擦損失が上昇し、ポンプ運転費が大きくなる。そのため、一概に人口減少に合わせて縮径することが全体の費用を最小化するとは限らない特徴を持っている。こうした観点の下、水道施設のライフサイクルアセスメント (LCA)⁴⁾により、施設更新をより合理的に行なうことを目的とした研究が行われるようになってきている。これらの研究により、既存の AM の捉え方である管路の布設年度を中心とした更新時期の設定や単純なダウンサイジングとは異なる考え方でライフサイクルコスト (LCC) やライフサイクル CO₂ (LCCO₂) を最小化する提案がされるなど、知見の蓄積が進んできた。

一方、LCA においては製品や施設の製造から廃棄までの長期間に渡る事業評価が必要になる。そのため、LCC においては社会的割引率 (SDR) を適用し、将来発生する費用を現在価値 (PV) 及びその総和 (NPV) に変換し事業評価を行なうことが求められる。しかし、日本で行われている送配水システムの LCA の多くがこの SDR を考慮していない。更に、

SDR の設定根拠となっている実勢の 10 年物国債にそぐわない設定が続いている問題がある。

そこで本研究では、SDR 見直しの方向性を確立するとともに SDR が与える影響について今後の関連研究が解決すべき課題を明らかにすることを目的とし、送配水システムの LCA への現在価値化の適用に関して適用事例と理論に限定してこれまでの知見と課題を整理するとともに著者らの既往研究⁵⁾に SDR の感度分析を実施する。

2. 送配水システムにおける LCA のレビュー

(1) 海外の知見

筆者らの知る限り、送配水システムの LCA では Filion ら⁶⁾が初めての実施事例にあたる。この研究では、管路の寿命を 10, 20, 50, 100 年と設定し、管路の事故率やリサイクルなどを考慮した LCA を実施している。LCA の結果、50 年程度の頻度で管路を更新することが LCC の観点から望ましいことなどが明らかになっている。

2008 年には、Wu ら⁷⁾が送配水システムにおける管路更新計画において管路口径を決定変数とし、LCC と LCCO₂ を最小化する多目的最適化を通して LCC と LCCO₂ のトレードオフ関係の存在を確認した。それ以降、関連研究が多く発表されるようになった。Wu ら⁸⁾は炭素税を用いて LCCO₂ を LCC に変換することで得られる総 LCC を最小化する単目的解とそれを行わない多目的最適化で得られた解を比較している。この研究では、単目的と多目的最適化の優劣について、多目的最適化ではパレート最適解の集合からなる Pareto Optimal Front が意思決定に有効なシステム投資水準と GHG 削減効果のトレードオフ関係を提供できることなどから多目的最適化のほうが送配水システムの最適化には好ましいと結論づけた。また、2008 年からこれまで継続的に SDR が送配水システムの最適化に与える影響について分析が行われている (3. (1) で説明)。2013 年からはこれまでの対象システムの管路を一斉に更新するという前提を見直し、各管路の更新時期も考慮した LCA が研究されはじめた。Prosser ら⁹⁾は LCC の最小化を目的に実在するシステムの管路更新順序の最適化を行っている。この論文では管路の供用年数を優先して更新する場合と LCC を優先して更新する場合での比較を行っている。Roshani and Filion ら¹⁰⁾は管路事故による被害額や漏水による影響を考慮した管路更新時期最適化モデルをネットワーク状の配水管網に適用し、予算制約の有無が最適更新時期に

与える影響を分析している。2014 年にはそれまでの知見を活用し、送配水システムの LCA が可能なソフトウェア¹¹⁾が開発、発表されてきた。また、Stokes ら¹²⁾によってそれまでの関連研究の包括的なレビューがなされ、本論の主題である SDR や炭素税といった外部経済的要素が LCA に与える影響の分析がより行われるべきだとの指摘がなされている。

(2) 日本の知見

日本では、厚生労働省が管路やポンプなどを網羅した積算に係る費用関数¹³⁾を公表し、水道技術研究センターが CO₂算定の原単位¹⁴⁾を整備したことを受け、2012 年からこれらを活用した送水システムの LCA が行われ始めた。堀川ら¹⁵⁾はポンプ圧送に依存する送水システムを対象に LCA を実施し、管路施設の LCCO₂の内 99.6% が建設過程で発生し、ポンプの LCCO₂の内、99.5% が運転過程で発生する結果を得ている。また、ポンプ圧送に与える影響が大きい管路の口径を維持したケースではそれらを縮径したケースよりも LCCO₂が小さくて済むという結果を受け、費用だけではなく LCCO₂削減の観点からもポンプ運転を考慮したシステム更新が求められると主張している。荒井ら¹⁶⁾は高低差などが異なる 5 種の送水システムにおける LCA を実施し、大口径管が LCCO₂を大きく削減する点やダウンサイジングだけではなく、自然流下のシステムを今後より一層考えるべきだと主張している。荒井ら¹⁷⁾は人口減少下での送水システムの LCA において流速や呼び径が異なる 5 つの口径候補における LCC 及び LCCO₂を算定し、過度なダウンサイジングは人口減少下であっても LCC 及び LCCO₂の観点からは望ましくはなく、運転過程を考慮した緩やかなダウンサイジングが有効であることを示した。しかし、この結論は 100 年という評価期間において管路：40 年毎、ポンプ：20 年毎に更新するケースのみで得られた結論であった。そこで、同様のシステムを対象に管路とポンプのライフサイクルを共に 20, 40, 80 年と増やした上でそれぞれを組み合わせた計 9 ケースでの LCA が行われている¹⁸⁾。検討の結果、管路は長い間隔で更新することで LCC 及び LCCO₂の多くを占める建設ステップの頻度を減らすことが LCC、LCCO₂双方の最小化に貢献することが明らかになった。一方、ポンプは水需要量の減少に合わせてこまめに更新することで LCC 及び LCCO₂双方の殆どを占める運転過程の負担を減らすアプローチが有効であることが明らかとなった。しかしながら、これらの研究は、LCC 及び LCCO₂に対して現在価値化を適用せず、時間軸によって異なる価値判断を総合評価に導入出来てい

表-1 対象文献で使われた SDR

著者	年度	社会的割引率
Wu et al. ^{7),22),23),8)}	08	0%,8%,Gamma
	08	0%,1.4%,8%
	09	0%,1.4%,2%,4%,6%,8%,HMT
	10	0%,8%
森ら ²⁸⁾	10	0%,2%,4%,8%
MacLeod and Filion ²⁵⁾	12	0%,1.4%,3%,8%
Roshani et al. ²⁶⁾	12	0%,1.4%,8%
Roshani and Filion ²⁷⁾	14	0%,1.4%,8%

図-1 各 SDR における DF の推移

ないという重要な問題を抱えている。

3. 現在価値化の適用事例

(1) 送配水システムの LCA に SDR が与える影響

これまで海外を中心に SDR が LCA を考慮した送配水システムの最適化に与える影響が分析されてきた。それらで用いられた SDR を表-1 にまとめる。また、SDR を用いた各年度 t の現在価値 (PV_t) の算定式は式 (1) のとおりである。なお、この時に C_t を 1 とした時に得られる各年度の換算係数を Discount Factor (DF) という。DF _{t} の計算結果を図-1 に示す。

$$PV_t = \frac{C_t}{(1+SDR)^t} \quad (1)$$

ただし、 PV_t : 現在価値、 C_t : 費用、 t : 年度。

送配水システムの LCA を考慮した最適化における SDR の影響についての議論が 2008 年から活発に行われてきた。まず、Simpson¹⁹⁾ がそれまでの SDR に関する議論をまとめ、送配水システムへの影響を考察するとともに様々な主張があることを考慮して感度分析を実施すべきであると主張した。その後、2010 年までに Wu らによって多くの論文が発表された。Wu ら⁷⁾ は初めて通減型²⁰⁾ を含む SDR を送配水システムの LCA を通した多目的最適化に適用し、高い SDR が運転過程で発生する費用や GHG 排出を大きく削減する結果、最適な口径が小口径側にシフトする傾向を明らかにしている。また、同年に「Stern Review²¹⁾」で用いられた 1.4% という SDR を初めて

適用している²²⁾。2009 年には、多種の SDR を送配水システムの LCA を考慮した配水池の設置計画に適用し、SDR の違いが多目的最適化で得られる解集合に与える影響を明らかにしている²³⁾。また、英国の Her Majesty's Treasury (HMT)²⁴⁾ の提唱する通減型 SDR の適用もこの時初めて行われた。

2012 年からは送配水システムの LCA を通してカナダの気候変動政策に SDR が与える影響についてカナダの実在するシステムを対象にケーススタディーが行われている。MacLeod and Filion²⁵⁾ はそれまでの炭素税や SDR に関する議論をまとめ、カナダの気候変動政策として用いられる可能性がある炭素税と SDR の将来シナリオを作成し、それらを対象の送配水システムに適用した。その結果、高い炭素税と低い SDR の組み合わせが同国の気候変動政策を強く後押しするとの結論を得た。Roshani ら²⁶⁾ はオンタリオ州のシステムにおいて、作成したシナリオを用いて送配水システムの単目的最適化を遺伝的アルゴリズムによって行った。検証の結果、作成したシナリオでは LCCO₂ が政府の目標に達しないとの結論を得ている。Roshani and Filion ら²⁷⁾ はオンタリオ州のシステムにおける AM でのケーススタディーを実施し、炭素税が与える影響が限定的である点や高い炭素税や低い SDR が運転費や漏水による損失、漏水に伴う修理によって発生する維持管理費の削減を促進する早期の更新や修繕を促進する効果があることが明らかとなっている。

一方、日本では 2. (2) でレビューした送配水システムの LCA において、SDR を適用した形跡は見られず、十分な検討がなされていない点が指摘できる。唯一、類似のものとして森ら²⁸⁾ の研究が挙げられる。この研究では、超長期に渡る水道管路更新計画の事業評価に SDR の感度分析を実施している。しかし、あくまで経済面からの評価に着目したものであり、GHG 排出に対する SDR の適用には言及していない。したがって、送配水システムの LCA や事業評価における SDR に関する知見が十分に蓄積されているとは言い難く、SDR の捉え方や実際の影響についての認識が十分になされていないと考えられる。

(2) GHG 排出への SDR 適用

現在価値化はそもそも将来の金銭に対して適用するものであって、排出量取引制度を想定しない中では GHG に対して安易に適用できるものではない。これまでの関連研究の適用事例をまとめ、どのような理由で GHG に対しての SDR の適用を正当化出来るのかを理論的に整理しなくてはならない。ここでは、その前段として既往の送配水 LCA における

図-2 近年の利回りの推移

GHG に対する SDR の適用事例などをまとめる。

Wu ら²³⁾は GHG にも同じ SDR を適用すべきとする主張²⁹⁾とそれぞれ異なる SDR を使用すべきという主張³⁰⁾があることを提示した。また、その中で IPCC が GHG 排出の影響を算定する際に 0% の SDR を用いている事実³⁰⁾と将来の技術革新を考えるとプラスの SDR を GHG 排出に用いるべきだとの主張³¹⁾から GHG 排出の SDR が 0% のケースと費用の SDR と等率として扱う 2 つのケースを採用している。結果として、GHG にも割引を行ったケースでは将来の GHG 排出（運転過程）の影響も低く評価されるため、建設時の GHG 排出が少なく、運転時の GHG 排出の大きい高所への配水池建設が有利になるという結果が得られている。

炭素税のアプローチで言えば、先述の Wu ら⁸⁾は炭素税による単目的最適化において、費用には割引を行なう一方で GHG 排出には割引を行わない手法を採用している。一方で MacLeod and Filion²⁵⁾は上記の議論を踏まえた上で GHG 排出に費用と同率での割引を行い、その後に炭素税を用いて貨幣化を行った後、費用の単目的としての送配水システムの最適化を行っている。その理由として、Roshani and Filion²⁶⁾は GHG 排出に対しての SDR の適用に関して様々な議論があることを踏まえた上で、カナダの GHG 排出に課される費用は電力料金の上乗せとして同一の費用として徴収される予定のため、費用と GHG 別々に SDR を用いることは不適切だとしている。Du ら³²⁾は早期に排出された GHG は後に排出されたものよりも長い滞留を持って環境に悪影響を与え、正の SDR を採用している。

また、GHG の計上方法として減価償却を適用するものもある。Du ら³²⁾は減価償却を適用し、管路建設に係る GHG 排出が長期間に渡って減価償却されるために管路更新間隔が長い場合には運転費低減を重視した大口径管の採用が望ましいという結果が得られている。また、水道技術研究センターが出版した手引き¹⁴⁾でも GHG に対して減価償却を適用した

LCA が行われている。

これらより、SDR と GHG に関する適用事例に関する議論は以下のように整理することが出来る。

- GHG 自体への SDR 適用の是非は早期に排出された GHG の滞留から肯定的な意見がある。一方、適用を否定する意見は見つからなかった。
- GHG 排出に適用する SDR は将来の不確実性や技術革新、滞留による影響の観点から正の SDR を用いる見解が一般的である。
- GHG 排出に適用する SDR は IPCC³³⁾が用いた 0% を適用するケースと費用の SDR と同率の SDR を GHG 排出にも採用するケースがある。
- 管路建設費などの資本形成由来の GHG 排出に対して減価償却を適用するアプローチがある。

4. 社会的割引率の理論と課題

(1) 長期利回りを用いた SDR の問題

日本の公共事業における費用便益分析に主に用いられる SDR は 4% である。これは、国土交通省のマニュアル³⁴⁾が推奨していることがその理由である。また、水道の費用便益分析に関するマニュアル³⁵⁾も国土交通省のマニュアルに準拠し、同率の SDR を設定している。その根拠として 10 年物の国債利回りが挙げられている。これを用いる理由として、長期に渡る政府の資金調達コストを反映している点が挙げられる。また、倫理という主観からその率自体が容易に左右すること自体に問題があるためとの指摘もあり³⁶⁾、利回りという客観的指標が必要という観点もある。加えて、国土交通省が 2009 年に発行したマニュアル³⁴⁾において、1986 年から 2002 年までの利回りの様々な移動平均値を示し、4% の SDR の妥当性を示した。しかし、それ以後は SDR が見直されたという事実は筆者らの知る限りはない。近年の国債の利回りの推移³⁷⁾を示した図-2(a)を見てみると、2000 年以降は 4% を切り、2015 年にはおよそ 1% あり

図-3 GHG 排出と社会的被害の関係

るいはそれ以下となっている。そして、2016年2月にマイナス金利に達した現状を考えると、この低下傾向は続くと考えるのが妥当である。

一方で管路の供用年数が40年を超えていることや水道の事業評価マニュアル³⁵⁾が算定期間を50年と定めているにも関わらず、10年物の国債利回りを用いることがそもそも適切ではないという指摘が出来る。一般的に償還年限が長くなるほどに様々なリスクに晒される可能性が高いためより長期国債の利回りは高くなる。しかし、現行で最長の償還年限を持つ40年物の国債利回り(2007年発行開始)の推移を示した図-2(b)を見てみると、2%前後で利回りが推移していることが分かる。

研究分野では、阪田・林山^{36), 38)}は4%のSDRの設定に批判的な視点を持った上で死亡率を考慮した効用関数でSDRの算定結果を2002年に発表している。死亡リスクを考慮した場合にもそうでない場合に比べてSDRは高くはなるものの、1992年頃まで4%を上回らないことを示した。加えて、SDRは全体的に低下する傾向にあるが、やや上昇する傾向も期間の評価期間終盤には見られ、一年毎の変動もあることなどから定期的にSDRの見直しを行なうことが必要であると主張している。また、より近年では高齢化が進行する社会で固定的なSDRを用いると将来の勤労世代の負担を過小評価し、最適な水準以下での投資を促進すると指摘されている³⁹⁾。

よって、実勢の利回りと現状用いられているSDRの乖離、ならびに既往研究の指摘を考えると、公共事業の意思決定を大きく左右するSDRについて、2009年以降行われていない見直しを本格的に行なう

時期に来ていると筆者は考えている。

(2) GHG への現在価値化の適用合理性

3. (2) で整理されたように、GHG に対する SDR の適用は GHG の大気中への滞留があるために合理的であるとされ、早期の排出の方がより大きい影響を与えるためにプラスの SDR を適用することが合理的だとされてきた。ここでは、GHG 排出への現在価値化の適用に関する理論を整理する。

CO₂をはじめとする GHG の多くは排出後数年から数千年以上の単位で大気中に滞留し続ける。IPCC の報告⁴⁰⁾によると、GHG 排出の 75% 以上を占める CO₂ の大気寿命はこれまでの送配水システムの LCA の最長期間である 100 年後において、およそ 30% から 55% が滞留し、1000 年後にも 15% から 40% が滞留し続けるとされている。また、Azar and Sterner ら⁴¹⁾によると、人為的排出による大気中の GHG 濃度と GHG 濃度に応じた被害は直線的比例関係があると指摘されている。これらに従うのであれば、図-3 に示す関係が成り立つことになる。図-3 (a) のように期間内の排出量が同じで排出経路が異なる A と B の 2 つの案を考える。A 案は B 案に比べて前半期の排出量が多く、後半期の排出量は B 案の方が多いとする。この際に対象のシステムが寄与した大気中の GHG 濃度上昇分は図-3 (b) のように表現ができる。したがって、前半期の排出量が多い A 案は評価期間全体に渡って GHG 濃度が B 案に比べて高い状態が続くことになる。先述のとおり、GHG 濃度とそれに応じた被害は直線的比例関係があるので双方の案の GHG 濃度の差分が気候変動による被害の差分となる。このことより、ある単位量の GHG 排出が社会全体に与える被害量は早期であるほどに高いと考えられ、排出された時期によって異なる価値を持つという判断に繋がっている。そのため、Azar and Sterner ら⁴¹⁾の指摘するように GHG 排出の時間的価値の差異を表現し、早期の排出に対しての重み付けを高くする正の SDR を用いたケースが見られる理由である。これが 3. (2) の (a) と (b) の見解の基礎となっていると整理できる。

(3) GHG に適用する SDR の設定に関する理論

3. (2) の (c) で整理したようにこれまでの送配水システムの LCA では、GHG に対して 0% の SDR を用いる、あるいは費用に適用する SDR と同率の SDR を用いるかのアプローチが取られてきた。しかし、4. (2) で説明したように GHG に対する現在価値化の適用は金銭的価値の評価に関する議論とは別の理由で正当化されており、市場の利回りをこれま

表-2 HMT の通減型割引率

期間	SDR
1-30年	3.5%
31-75年	3.0%
76-125年	2.5%
126-200年	2.0%
200-300年	1.5%
301年以上	1.0%

表-3 管路口径の候補と設定条件

口径候補	条件
口径: 極小	管内流速 3.5m/sを上回らない
口径: 小	管内流速 2.5m/sを上回らない
口径: 中	管内流速 1.5m/sを上回らない
口径: 大	「口径: 中」よりも1ランクアップ
口径: 極大	「口径: 中」よりも2ランクアップ

での費用に対する SDR として設定する理論をそのまま GHG の SDR の設定の理論とするのは適切ではないとする指摘がある^{41), 42)}。また、GHG が数百年、数千年以上の時間軸で滞留するため、評価期間のある時点で排出された GHG による被害は超長期に渡り、市場で観察される利回り自体そういった超長期の選好を含んではいない、GHG 排出の影響が持つ時間軸が費用の時間軸よりも長いにも関わらず、費用に適用する SDR と同率の SDR を用いることは図-1にあるように GHG 排出によって受ける超長期の被害をほぼ無視することを意味する。この観点を無視して相対的に高い SDR を用いた場合、現在の世代が経済活動という利益を得る代わりに後の世代が温暖化問題という被害に晒されるというバイアスが強

くなるという問題がある。そのため、GHG 排出の評価に関しては将来世代との公平性確保の観点から費用に適用する SDR よりも GHG 排出へ適用する SDR を低くとるべきだと指摘がなされている⁴²⁾。

このように倫理面から SDR を捉える考え方は「規範的アプローチ」と呼ばれ、逆に実際の市場で観察される利子率や貯蓄率から SDR を求める考え方を「記述的アプローチ」と呼び、過去に Stern が 2006 年に発表した「Stern Review²¹⁾」で用いられた低率な 1.4% の SDR を巡って記述的アプローチをとる Nordhaus⁴³⁾をはじめとする研究者⁴⁴⁾⁻⁴⁶⁾から規範的アプローチをとる Stern に対する批判的な意見があった。この議論は SDR の感度分析を含む Stern Review に関する補足資料⁴⁷⁾の公表とその感度分析が不適切とする批判⁴⁸⁾が 2010 年になされたように規範的アプローチと記述的アプローチを巡る議論が続いており、長期的な経済評価に用いるべき SDR の議論に決着はついていない。

3. (2) の (c) でまとめられたように、IPCC³⁰⁾で用いられた 0% を GHG の現在価値化に用いる手法は規範的アプローチに基づいたものと言え、費用に適用する SDR と同率の SDR を用いるというのは記述的アプローチに基づいたものであったと言える。これらの適用手法が適切だったかどうかは双方のアプローチの議論の決着如何に依存し、事業評価や送配水システムの LCA においては双方のアプローチに基づいた分析が必要だと考えられる。

(4) 通減型割引率

3. (1) でまとめたように、送配水システムの LCA における SDR の感度分析事例では HMT や Gamma と呼ばれる通減型割引率が使用されている。通減型割引率 (Declining Discount Rate: DDR) とは、HMT が発行する Green Book²⁴⁾にて指定され、公共事業評価

表-4 LCC 及び LCCO₂ の NPV の計算結果

(a)LCC[百万円]						(b)LCCO ₂ [ton-CO ₂]					
更新間隔		社会的割引率				更新間隔		社会的割引率			
管路	ポンプ	0%	2%	4%	8%	管路	ポンプ	0%	2%	4%	8%
20	20	中: 30,673	中: 16,866	中: 11,792	中: 8,278	20	20	極大: 163,418	極大: 86,453	極大: 58,027	極大: 38,059
	40	中: 30,771	中: 16,904	中: 11,809	中: 8,289		40	極大: 172,169	極大: 90,387	極大: 60,345	極大: 39,015
	80	中: 37,701	中: 17,196	中: 11,932	中: 8,353		80	極大: 188,549	極大: 96,060	極大: 62,788	極大: 40,053
40	20	中: 22,603	中: 12,769	中: 9,406	中: 7,266	40	20	極大: 143,646	極大: 76,603	極大: 52,530	極大: 35,651
	40	大: 23,208	中: 12,991	中: 9,509	中: 7,318		40	極大: 154,117	極大: 81,158	極大: 54,963	極大: 36,743
	80	大: 23,961	中: 13,284	中: 9,632	中: 7,382		80	極大: 170,497	極大: 86,831	極大: 57,046	極大: 37,781
80	20	大: 17,945	中: 10,772	中: 8,493	中: 7,402	80	20	極大: 131,115	極大: 71,221	極大: 50,072	極大: 35,002
	40	大: 18,077	中: 10,939	中: 8,575	中: 7,083		40	極大: 140,750	極大: 75,534	極大: 52,411	極大: 36,049
	80	大: 19,276	大: 11,455	中: 8,839	中: 7,207		80	極大: 161,265	極大: 82,642	極大: 55,473	極大: 37,349

注: 太線で囲まれている部分は SDR が 0% 時の最適口径からシフトしたケース

図-4 SDR が 0% 及び 4% の時の年度別の現在価値（管路：80 年毎，ポンプ：20 年毎更新）

図-5 LCC における建設と運転維持管理の比率

に対して公式に採用されているものや Weitzman の提唱する Gamma discounting²⁰⁾ に代表されるものであり、表-2 のように時間が経過するほどに率が低下する形をとる SDR である。日本では、大谷ら⁴⁹⁾ が主要先進国や国際機関における公共事業に用いられている SDR についてその調査と理論についての包括的なレビューを行っており、その中で割引率が時間とともに逓減する DDR の適用事例をまとめている。

時間逓減の理由として、Weitzman²⁰⁾ や Gollier and Weitzman⁵⁰⁾ による将来の SDR に関する不確実性の導入による SDR 時間逓減の証明や不確実性の増加に伴う個人の時間選好率の低下という実証実験結果の反映⁵¹⁾ がある。英国では、SDR の算定に式 (2) のラムゼイルールを採用しているが、時間経過とともに時間選好率が低くなるということは SDR が時間の経過とともに低くなっていくということになる。

$$SDR = \rho + \theta g \quad (2)$$

ただし、 ρ ：時間選好率、 θ ：限界効用の弾力性、 g ：消費の成長率。

DDR の適用は未だに決着のつかない規範的アプローチと記述的アプローチの議論の双方を考慮しているという点でも有効である。4. (3) で説明したように規範的アプローチは遠い将来の世代が受ける被害や便益を軽視してはならないという観点から相対的に低い SDR を設定しようとするものであるのに対し、記述的アプローチは市場利子率や貯蓄率を考慮して相対的に高い SDR を設定しようとするものであった。規範的アプローチを支持し、利回りよりも相対的に低い SDR を採用すると短期的な収益が十分に得られない可能性がある一方、記述的アプローチを支持し、相対的に高い SDR を採用すると将来世代への負担が大きくなってしまいう問題を抱えることとなる。しかし、DDR を適用することにより、現存する国債利回りを可能な限り SDR に反映し、短期的な収益の理論的整合性を確保すると共に利回りを直接反映できない長期における SDR を逓減させ、将来の価値を過度に低く見積もらないという取扱が可能になる。

5. 送水システムにおける SDR の感度分析

(1) 条件設定

ここでは、著者らが以前実施した送水システムへの LCA⁵⁾ に欠けていた NPV の算定を行い、その結果を提示する。また、その結果より SDR が送配水システムの LCA に与える影響と実務上の意思決定に与える影響について考察する。なお、LCA を行なうにあたっての水利条件や費用関数などの諸条件は既往研究⁵⁾ と同様とする。本分析で用いる管路口径の候補と設定条件は表-3 のとおりである。感度分析で用

図-6 現在価値化に減価償却が与える影響の例

いる SDR は、既往研究の結果である 0% に加え、図-2 に示した現行の国債利回りを反映した 2%、日本で最も一般的である現行の 4%、表-1 にあるように既往研究で用いられた最大値である 8% の計 4 つとし、各年度の PV は式 (1) によって算出した。また、評価年度は評価開始点を 0 年目とし、評価終了時を 100 年目として取り扱った。

(2) SDR による最適口径縮小のメカニズム

感度分析の結果を見ると、表-4 にあるように「口径：大」から「口径：中」へ最適口径が縮小したケースがいくつかある。その中で管路：80 年毎、ポンプ：20 年毎に更新するケースを例に SDR 適用による最適口径縮小のメカニズムを分析する。

図-4 は SDR=0% と 4% における年度別費用の PV とその合計値である NPV を示している。SDR=0% のケースと比較して 4% のケースでは割引によって特に 40 年以降に発生する費用に価値が殆ど発生していないことが分かる。この割引によって毎年発生する O&M 費と単発の建設費の関係に変化が生じる。人口減少下においては将来の水需要が減少していくのに伴い口径が縮径され、ポンプ出力も落ちていく。そのため、評価開始時の投資（管路建設費及びポンプ整備費）が全体に占める割合が高い。加えて、評価開始時の初期投資は割引されない一方、将来発生する O&M 費は図-1 にあるように年々指数関数的に小さくなる DF を乗じることで減少していく。この結果として、建設投資が占める割合がより強調

され、NPV に占める建設費の割合が高くなる（図-5）。上記の NPV に占める建設費の割合の上昇が最適口径にも影響を与える。O&M 費が大きく割り引かれ、建設費が NPV に占める割合が上昇するということは LCC の最小化においては SDR=0% の時以上に建設費、特にその殆どを占める管路建設費の削減が必要になる。その結果、最適解は SDR が高いほどに小口径側にシフトすることになる。

LCCO₂ に関しては SDR による影響はなかった。したがって、今回の分析では 4. (3) で言及した規範的及び記述的のアプローチどちらを採用しても LCCO₂ には大きな影響はないと言える。しかし、3. (1) でまとめた既往研究では LCCO₂ を指標にした際にも費用と同様のメカニズムで最適口径が縮小することが報告されている。今回の検討では口径を変数とした一般的な管路ネットワーク最適化とは異なり、管路毎の更新時期や口径候補などの変数の数を絞った形での検討を行っているために SDR に対する感度が低かったと考えられ、変数に多様性を持たせた最適化では LCCO₂ を指標とした場合でも SDR が高いと最適口径が縮小する傾向が得られると考えられる。

6. 考察

ここでは文献レビューと感度分析の結果を踏まえ、今後の水道事業に用いる SDR の見直しの方向性と将来の管路システムの AM に現行の SDR などが

与えるバイアスについて考察を加える。

(1) 水道事業における SDR 見直しの方向性

今後の SDR 見直しにおいて、筆者は SDR を実勢の利回りに合わせて引き下げると同時に設定対象とする国債の償還年限をより長期、水道事業の費用便益算定マニュアル³⁵⁾の指定する 50 年の評価期間に従うのであれば、現状として最長の償還年限である 40 年を対象の償還年限とする方向性を推奨したい。実際、オランダやドイツのような主要先進国が実勢の利回りの低下を理由に SDR の下方修正を行っている事例もある上、日本よりも SDR が低い主要先進国も複数存在する⁴⁹⁾。

一方、対象とする国債の償還年限を 40 年まで引き伸ばしても費用便益算定マニュアルの指定する 50 年とは年数の一致が十分に取れていないという問題と LCA のようなより長期な事業評価の場合に用いる SDR としては理論的に整合性が取れていないという問題が残る。この問題の解決策として DDR の適用が挙げられる。Green Book では 1 年目から 30 年目までは 3.5% の SDR を採用しているが、これは英国の発行する国債の最長償還年限が 30 年であるためであり、この期間までは将来の利回りが予想可能であるとの前提で 30 年までは実勢の国債利回りを反映した SDR を設定している。日本にこれを当てはめると、国債の最長償還年限である 40 年目までは 40 年物国債の金利を反映した SDR を設定し、それ以降は逡減する形で次第に SDR が低下するようにすることが適切であると言える。また、DDR の適用は 4. (4) で言及したように環境面に対する割引率を巡る規範的アプローチと記述的アプローチ双方の主張を満たす点でも有効であると言える。

(2) 減価償却の適用不合理性

本来、減価償却というのは固定資産として生産を行なう設備に対して老朽化による資産価値減衰を表現することと次回更新時に向けた資金積立を目的として金銭価値に適用されるものであり、GHG 排出へ減価償却を適用していた文献^{14), 32)}では、GHG 排出に減価償却を適用することに対する理論的な説明が十分になされていない。ここからは、上記の GHG に対する正の SDR を用いた現在価値化の理論が正しいとの立場に立った上で GHG 排出に減価償却を適用することが誤った意思決定をもたらす可能性があることを指摘する。

この問題は以前から Cherubini and Stromman⁵²⁾や O' Hare ら⁵³⁾指摘しているように GHG への減価償却の適用によって本来の GHG 由来の被害を不適切に

低く見積もることであると説明できる。例として、評価開始時を 0 年目とし、0 年目に管路建設があると考える (図-6)。減価償却がない場合、管路建設に由来する GHG 排出を発生年度に全て計上している一方、減価償却ありの場合は減価償却期間に従って 0 年目に発生した GHG 排出を多年度に分割して計上している。これらに割引を適用すると、減価償却なしのケースでは DF_0 が 1.0 なので割引適用前後の価値変化は生じない。減価償却ありの場合は図-1にあるように DF_1 以降が 1.0 よりも次第に小さくなるために減価償却なしのケースに比べて GHG の NPV が小さくなってしまう。その結果として、本来評価されるべき価値よりも早期の GHG 排出の重要性を低く見積もるようになってしまう。

冒頭で述べたように管路建設費を決める管路口径とポンプの運転費は管路摩擦損失を原因としたトレードオフ関係にあり、管路口径の設定によって後に発生するポンプ運転費が変化する。GHG に対して減価償却を適用した場合、より早期に排出される管路の建設由来の GHG の方が後に発生するポンプ運転費よりも重要にも関わらず、管路建設由来の GHG がポンプ運転費と同様に計上され、同等に割引引かれていく。その結果、本来は管路口径を小さくすることでより早期に排出される管路建設由来の GHG 排出を抑えることが重要にも関わらず、減価償却の適用によって大口径の管路が好ましいとする矛盾した解を導出することとなる。したがって、GHG 排出による環境への影響を適切に評価するという面からすると管路建設に由来する GHG 排出への減価償却の適用は避けられるべきだと考えられる。

(3) 将来世代との投資の公平性

送配水システムの AM においては、投資の平準化が一つの重要な要素となる。人口減少下の日本において、将来の世代に老朽化した施設の更新投資を集中させることは予算や職員及び業者の数、また、意思決定に参加できない世代への負担の押し付けという倫理的な観点からして望ましくないからである。

5. (2) で説明したように、高い SDR を適用すると管路口径に依存する管路建設費の削減が好ましくなり、ポンプ運転費が高くなるシステムを構築することとなる。これは、高い SDR によるイニシャルコストの重視とポンプ運転費や漏水、管路事故に伴う被害など日常的に発生する O&M 費の軽視と言い換えることが可能であり、将来世代への負担増が高い SDR によってもたらされる可能性が示唆される。

管路の更新順序を考えた際、SDR が高くなると、DF が小さくなるので、莫大な費用が必要になる管路

の更新投資を後延ばししたほうがNPVとしては優れたものとなる。したがって、時代背景を反映しない過度に高いSDRの採用は世代間の不公平を生む原因となり得る。これまでの、人口増加と水道普及率の向上による接続世帯数の増加による給水収益上昇が見込まれた。そのため、将来世代の負担を考えるよりも現在の負担を軽減することのほうが妥当であったと考えられる。一方で、人口減少時代に突入し、将来の給水収益の減少と更新投資の増加が見込まれる状況下ではこの意味が逆になり、早期の投資によって将来世代の負担を軽減することが有効であると考えられる。つまり、将来の価値を高く評価する低いSDRの適用が将来世代との投資の公平性という倫理的な観点からは妥当だと考えられる。

ただし、2. (1) で指摘したように更新の先延ばしによるO&M費の増大や漏水の発生といった要素を考慮した時にいつ管路を更新したほうが良いかという時間軸を考慮した最適化も含めたLCAにおいて、SDRの感度分析を実施した例は筆者らの知る限りは存在せず、その影響について定量的に実証されていない。また、管路やポンプの資本費に減価償却を適用した際にSDRの影響をどのように受けるかについての検討もなされていない。この点も関連研究が今後行なうべき要素であると指摘できる。

7. おわりに

本研究では、送配水システムにおけるLCAと現在価値化の適用に関する既往研究のレビューを行い、そこで用いられたSDRに関する理論を整理した後、実際のLCA事例にSDRの感度分析を実施した。そして、文献レビューや感度分析結果から水道事業におけるSDR見直しの方向性とSDRが実務的な意思決定に与える影響を考察した。本研究で明らかにした傾向や将来への示唆は送配水システムだけではなく、建設、O&Mのライフサイクルを持つ多くのインフラ関連政策や研究にも当てはまると考えられる。

SDRの設定を巡る議論は本論でまとめたように統一した見解があるわけではなく、ある一定の客観的な見解の中でこれまでSDRが決められてきた。それに相当するのが各省庁のマニュアル^{34), 35)}であり、現在使用されている長期国債の利回りとなる。長年改訂が行われていないSDRについても現行の4%と国債利回りの乖離は勿論のこと、環境面、投資水準の公平性などの観点からもSDRを低くする方向での再検討が人口減少時代に突入し、これまでの「右肩上がり」を前提とする理論とは異なるパラダイム

シフトの中で必要であると考えられる。

今後の課題として、6. (3) で挙げたSDRが管路の最適投資時期に与える影響の分析や管路やポンプの資本に対する減価償却適用による影響の比較、それらの検討を可能とするモデルの構築が必要だと言える。また、今回は炭素税や炭素の社会的費用といったGHGの費用換算について触れていない。加えて、SDRと不確実性の関係性についても触れていない。今後は上記の課題に関する議論の整理や最適化問題への適用にも取り組んでいきたい。

謝辞：本論文の一部は、公益財団法人 水道技術研究センターによるRainbowsプロジェクトの研究成果であることを付記し、本成果が水道インフラの更新・維持管理の一助となるならば幸甚である。

参考文献

- 1) 小椋和生, 三山健一郎, 尾瀬良治, 津田巖: 水需要減少等を踏まえた送水ポンプ整備の検討, 平成27年度全国会議(水道研究発表会)講演集, 2015, pp. 524-525.
- 2) 肥田悠, 小出大輔: 配水管網整備事業の事業量及びダウンサイジングによるコスト縮減効果に関する考察, 平成27年度全国会議(水道研究発表会)講演集, 2015, pp. 376-377.
- 3) 日本水道協会: 水道の安全保障に関する検討会報告書, 2010.
- 4) 井村秀文: 建設のLCA, オーム社, 2001.
- 5) 荒井康裕, 長谷川高平, 阿部翔, 小泉明, 稲貝とよの: 送水ネットワークを対象としたライフサイクルコスト及びCO₂排出量-管路及びポンプのライフサイクルに着目した分析-, 土木学会論文集G, Vol. 71, No. 6, pp. II-377-II-386, 2015.
- 6) Y. R. Filion, H. L. MacLean, B. W. Karney: Life-Cycle Energy Analysis of a Water Distribution System, *J. of Infrastructure Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 120-130, 2004.
- 7) W. Wu, A. R. Simpson, H. R. Maier: Multi-objective Genetic Algorithm Optimisation of Water Distribution Systems Accounting for Sustainability, *Proc. Water Down Under 2008*, pp. 1750-1761, 2008.
- 8) W. Wu, H. R. Maier, A. R. Simpson: Single-Objective versus Multiobjective Optimization of Water Distribution Systems Accounting for Greenhouse Gas Emissions by Carbon Pricing, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, Vol. 136, No. 5, pp. 555-565, 2010.
- 9) M. E. E. Prosser, V. L. Speight, Y. R. Filion: Life-cycle energy analysis of performance- versus age-based pipe replacement schedules, *J. AWWA*, Vol. 105, No. 12, pp. E721-E732, 2013.

- 10) E. Roshani, Y. R. Filion: Event-based approach to optimize the timing of water main rehabilitation with asset management strategies, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, Vol. 140, No. 6, p. 4014004, 2013.
- 11) C. S. Stokes, A. R. Simpson, H. R. Maier: A computational software tool for the minimization of costs and greenhouse gas emissions associated with water distribution systems, *Environ. Model. Softw.*, Vol. 69, pp. 452–467, 2015.
- 12) C. Stokes, A. Simpson, H. Maier: The cost-greenhouse gas emission nexus for water distribution systems including the consideration of energy generating infrastructure: an integrated conceptual optimization framework and review of literature, *Earth Perspect.*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–17, 2014.
- 13) 厚生労働省健康局水道課: 水道事業の再構築に関する施設更新費用算定の手引き, 2011.
- 14) 公益財団法人水道技術研究センター: 管路施設の LCA に関する研究, 持続可能な水道サービスのための管路技術に関する研究(e-Pipe プロジェクト), 2011, pp. 5–1–5–108.
- 15) 堀川博哉, 荒井康裕, 小泉明, B. Bakri: 水道管路ネットワークの環境影響評価に関する一考察, 土木学会第 67 回年次学術講演会, pp. 171–172, 2012.
- 16) 荒井康裕, 小泉明, 堀川博哉, 稲貝とよの, B. Bakri: 水道管路システムのライフサイクル CO₂ に関するモデル分析, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 69, No. 7, p. III_337–III_344, 2013.
- 17) 荒井康裕, 小泉明, 堀川博哉, 恩田雄太郎, B. Bakri: 水道管路インフラの LCA 的評価に関する研究—送水ネットワークを対象としたライフサイクルコスト及び CO₂ 排出量の把握—, 土木学会論文集 G (環境), Vol. 69, No. 6, pp. II_351–II_358, 2013.
- 18) 長谷川高平, 荒井康裕, 小泉明, 稲貝とよの: 送水ネットワークにおける管路・ポンプの更新間隔を考慮したライフサイクルコスト及び CO₂ の把握, 平成 27 年度全国会議 (水道研究発表会) 講演集, 2015, pp. 372–373.
- 19) A. R. Simpson: Selecting a discount rate for evaluating water distribution projects—The sustainability controversy, in *Water Distribution System Analysis; August 17*, 2008, Vol. 20, pp. 1–12.
- 20) Weitzman, Martin: Gamma Discounting, *Am. Econ. Rev.*, Vol. 91, No. 1, pp. 260–271, 2001.
- 21) N. H. Stern, Her Majesty's Treasury: Stern Review: The economics of climate change, 2006.
- 22) W. Wu, A. R. Simpson, H. R. Maier: Water distribution system optimisation accounting for a range of future possible carbon prices, in *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference, WDSA 2008*, 2008, pp. 278–289.
- 23) W. Wu, A. R. Simpson, H. R. Maier: Accounting for greenhouse gas emissions in multiobjective genetic algorithm optimization of water distribution systems, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, Vol. 136, No. 2, pp. 146–155, 2009.
- 24) Her Majesty's Treasury: The Green Book: appraisal and evaluation in central government: Treasury guidance, Stationery Office, 2003.
- 25) S. P. MacLeod, Y. R. Filion: Issues and Implications of Carbon-Abatement Discounting and Pricing for Drinking Water System Design in Canada, *Water Resour. Manag.*, Vol. 26, No. 1, pp. 43–61, 2012.
- 26) E. Roshani, S. P. MacLeod, Y. R. Filion: Evaluating the Impact of Climate Change Mitigation Strategies on the Optimal Design and Expansion of the Amherstview, Ontario, Water Network: Canadian Case Study, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, Vol. 138, No. 2, pp. 100–110, 2012.
- 27) E. Roshani, Y. Filion: Water Distribution System Rehabilitation under Climate Change Mitigation Scenarios in Canada, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, Vol. 141, No. 4, p. 4014066, 2014.
- 28) 森正幸, 稲貝とよの, 小泉明, 渡辺晴彦, 沼田篤男: 水道管路の超長期的な更新投資の経済性評価に関する研究, 水道協会雑誌, Vol. 79, No. 7, pp. 2–12, 2010.
- 29) G. C. Van Kooten, A. Grainger, E. Ley, G. Marland, B. Solberg: Conceptual issues related to carbon sequestration: Uncertainty and time, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, Vol. 27, No. S1, pp. 65–82, 1997.
- 30) P. M. Fearnside: Time preference in global warming calculations: a proposal for a unified index, *Ecol. Econ.*, Vol. 41, No. 1, pp. 21–31, 2002.
- 31) P. M. Fearnside, D. A. Lashof, P. Moura-Costa: Accounting for time in mitigating global warming through land-use change and forestry, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, Vol. 5, No. 3, pp. 239–270, 2000.
- 32) F. Du, G. J. Woods, D. Kang, K. E. Lansey, R. G. Arnold: Life Cycle Analysis for Water and Wastewater Pipe Materials, *J. Environ. Eng.*, Vol. 139, No. 5, pp. 703–711, 2013.
- 33) P. M. Fearnside: Time preference in global warming calculations: A proposal for a unified index, *Ecol. Econ.*, Vol. 41, No. 1, pp. 21–31, 2002.
- 34) 国土交通省: 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針 (共通編), 2009.
- 35) 厚生労働省健康局水道課: 水道事業の費用対効果分析マニュアル, 2011.
- 36) 阪田和哉, 林山泰久: 社会資本整備における社会的割引率に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 26,

- 2002.
- 37) 財務省:過去の国債の入札情報, 2015. [URL]. Available: http://www.mof.go.jp/jgbs/auction/past_auction_schedule/. [アクセス日: 2016年2月].
 - 38) 阪田和哉, 林山泰久:会資本ストックの社会的割引率に関する実証的研究, 応用地域学研究, No. 7, pp. 99–109, 2002.
 - 39) S. Segi, K. Kobayashi: Planning Implication of Invariant Population Assumptions in Depopulation and Aging Society, J. Japan Soc. Civ. Eng. Ser. D3 (Infrastructure Plan. Manag. , Vol. 69, No. 5, pp. I_205–I_216, 2013.
 - 40) P. Ciais, C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann: Carbon and other biogeochemical cycles, in Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2014, pp. 465–570.
 - 41) C. Azar, T. Sterner: Discounting and distributional considerations in the context of global warming, Ecol. Econ. , Vol. 19, No. 2, pp. 169–184, 1996.
 - 42) 大瀧正子:地球温暖化問題の経済分析における将来世代の厚生評価の問題点–技術代替性と割引率をめぐる Nordhaus, Cline, Stern の比較を事例にして, 立命館国際研究, Vol. 21, No. 2, pp. 281–299, 2008.
 - 43) W. D. Nordhaus: A review of the “ Stern review on the economics of climate change”, J. Econ. Lit. , Vol. 45, No. 3, pp. 686–702, 2007.
 - 44) R. M. Carter, C. R. De Freitas, I. M. Goklany, D. Holland, R. S. Lindzen, I. Byatt, I. Castles, D. Henderson, N. Lawson, R. McKittrick: The Stern review: a dual critique, World Econ. , Vol. 7, No. 4, pp. 165–232, 2006.
 - 45) J. P. Weyant: A critique of the Stern Review’s mitigation cost analyses and integrated assessment, Rev. Environ. Econ. Policy, Vol. 2, No. 1, pp. 77–93, 2008.
 - 46) P. Dasgupta: The Stern Review’s economics of climate change, Natl. Inst. Econ. Rev. , No. 199, pp. 4–7, 2007.
 - 47) N. Stern: Technical Annex to Postscript, 2007.
 - 48) A. Saltelli, B. D’Hombres: Sensitivity analysis didn’t help. A practitioner’s critique of the Stern review, Glob. Environ. Chang. , Vol. 20, No. 2, pp. 298–302, May 2010.
 - 49) 大谷悟, 佐渡周子, 今野水己, 土谷和之, 牧浩太郎: 主要先進国等の公共事業評価に適用される社会的割引率, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol. 69, No. 5, pp. I_163–I_171, 2013.
 - 50) C. Gollier, M. L. Weitzman: How should the distant future be discounted when discount rates are uncertain?, Econ. Lett. , Vol. 107, No. 3, pp. 350–353, 2010.
 - 51) OXERA: Social Time Preference Rate for Use in Long-term Discounting., OXERA Press, 2002.
 - 52) F. Cherubini, A. H. Strømman: Life cycle assessment of bioenergy systems: state of the art and future challenges. , Bioresour. Technol. , Vol. 102, No. 2, pp. 437–51, 2011.
 - 53) M. O’Hare, R. J. Plevin, J. I. Martin, A. D. Jones, A. Kendall, E. Hopson: Proper accounting for time increases crop-based biofuels’ greenhouse gas deficit versus petroleum, Environ. Res. Lett. , Vol. 4, No. 2, p. 24001, 2009.

(2016. 3. 22 受付)

A REVIEW OF SOCIAL DISCOUNT RATE FOR LIFE CYCLE ASSESSMENT OF WATER DISTRIBUTION SYSTEMS

Kohei HASEGAWA, Yasuhiro ARAI, and Akira KOIZUMI

Much of research to date has analyzed the effect of Social Discount Rate (SDR) on optimization of water distribution systems (WDSs). However, the relevant ministries in Japan have not reviewed the SDR both theoretically and practically over a long term even though SDR dramatically changes the results of analyses. To establish the methods of calibration of SDR and point out the issues that related research in optimization of WDSs must further investigate, this study reviewed a range of research analyzing the influence of SDR in WDSs from both theoretical and practical perspectives. In addition, this study conducted sensitivity analysis of SDR in a Japanese WDS. This study found that (1) current SDR set by Japanese ministries deviates from current interest rates and bond yield periods, (2) some previous studies have adapted inappropriate amortization for greenhouse gas emissions, (3) continuous use of relatively higher SDR causes inequality between cost and environmental burdens borne by later generations. Consequently, this study proposed that Japan’s government should calibrate SDR to lower it and adopt declining discount rates after 40 years (i. e. Japan’s maximum bond calculation year).