

## ベトナム・ハノイ市における社会的評価基準による地下水持続可能性評価

首都大学東京	都市環境科学部	学生員	○下地 誠
首都大学東京	都市環境科学研究科	正会員	河村 明
首都大学東京	都市環境科学研究科	正会員	天口 英雄
首都大学東京	都市環境科学研究科	学生員	Nuong Thi Bui

## 1. はじめに

ベトナムの首都ハノイ市は、近年の急速な都市化により未処理の工業、農業、水産業、家庭排水等が直接河川に排出されているため、ほとんどの河川や湖で深刻な汚染が進んでおり、地下水資源が最も重要な水供給源となっている。しかしながら、適切な管理がなされないままでの過剰な地下水取水は地下水位低下を引き起こし、井戸水を利用する自治体の水不足のみならず、地盤沈下や地下水汚染といった種々の有害な影響が報告されている<sup>1),2)</sup>。さらにハノイ市における地下水質に関しては、ヒ素や大腸菌、そしてリン・窒素による汚染も報告されている。これら地下水の量的質的劣化によりハノイ市民の生活用水の安全性が脅かされており、地下水の持続可能性評価が強く望まれている。しかしながら、地下水の持続可能性評価に関する研究は殆ど見受けられない。持続可能性評価の手法として、よく用いられているのは多基準意思決定(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)手法であり<sup>3)</sup>、その1つである階層分析法(Analytic Hierarchy Process, 以下「AHP」と記す)は鉱業分野、地域水資源<sup>4)</sup>等の様々な持続可能性評価に利用されている。持続可能性は通常、経済・社会・環境という3つの評価基準で評価され、著者らはAHPを用いた環境評価基準によるハノイ市地下水の持続可能性評価を試みた<sup>5)</sup>。一方、社会的評価基準による持続可能性評価はその重要性が指摘されているにも関わらず、収集できるデータの制約上、適当な持続可能性指標(Sustainability Indicator, 以下「SI」と記す)を選択することが困難であった。したがって地下水問題に限らず、社会的評価基準による持続可能性評価はあまり行われていない。そこで本研究では、AHPを用いてハノイ市における地下水資源の社会的評価基準による持続可能性評価を試みた。この場合、社会的評価基準に対する具体的なSIを提示するとともに、持続可能性指数関数(Sustainability Index Function, 以下「SIF」と記す)を提案・導入し、SIFを線形及び非線形とした場合の最終的な評価値である持続可能性指数を算定し、それらの現況反映性について検討を行った。

## 2. 対象地域

本研究で対象とするハノイ市は図-1に示すようにベトナムの北東に位置し、面積は3324.5 km<sup>2</sup>、2015年の人口は759万人とベトナム全人口の約1割を占めている。ハノイ市は熱帯モンスーン地域に属し、雨期(5~10月)、乾期(11~4月)という2つの季節を有する。年間降雨量は約1600mm、平均湿度約80%、そして平均気温は24.3°Cであるが、蒸発量は年間933mmと極めて高い<sup>6)</sup>。また、密集した河川網(0.7 km/km<sup>2</sup>)を有しており、それらは主に紅河水系と連結されている。ハノイ市の地下水資源は、地域の水供給源である更新世被圧帯水層(PCA)及び主に中小規模の家庭用水に用いられる完新世不圧帯水層(HUA)に存在している。

## 3. 持続可能性評価手法

## (1) 標準的なAHPの手順

AHPを持続可能性評価に適用する場合の特徴として、全体の持続可能性を個々の構成要素(階層)に分割し、それぞれの階層を独立に分析できる事が挙げられる。AHPを地下水資源の持続可能性評価に適用する場合、通常以下の4つの手順で行われる。

- (i) 対象地域における現状と実際の問題に関する包括的な調査を行い、持続可能性をいくつかの持続可能性アスペクト(Sustainability Aspect, 以下「SA」と記す)に区分する。次いで、各SAを構成するSIを具体的に提示する。
- (ii) 専門家の知見(通常アンケート)から、各SA及びSIの重み付けを行う。
- (iii) 各SIを算定するためのデータを収集する。
- (iv) SIの値 $x$ とその重みから持続可能性指数 $Q$ を算定し、持続可能性評価を行う。 $x$ は通常0~1の無次元値として表現され、その値がそのまま $Q$ となる。

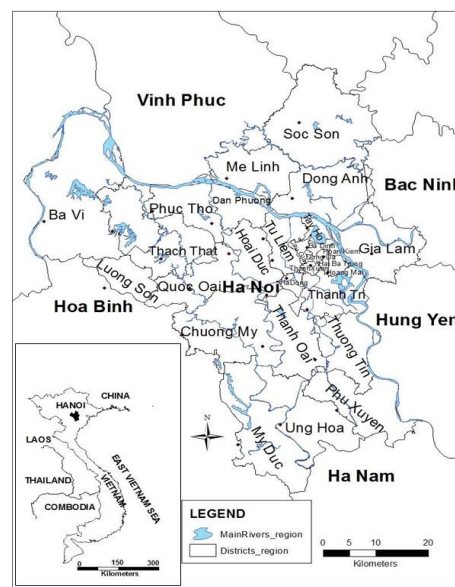


図-1 対象地域のハノイ市

キーワード 社会的評価基準, 持続可能性指数, 持続可能性指標, 持続可能性アスペクト, AHP, 地下水, ハノイ市

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1 首都大学東京 E-mail: shimoji-makoto@ed.tmu.ac.jp

(2) 提案する AHP の手順

本研究で提案する SIF を導入した AHP (SIF-AHP)について、その4つの手順を以下に説明する。

- (i) 標準的な AHP と同様に、階層構造を設定する。
- (ii) 各 SA, SI の重み付けを行う。標準的な AHP の重み付けでは通常何名かの専門家に対して、各 SA, SI のそれぞれの組み合わせについて一対比較評価を依頼する。その評価の一貫性が満足されるまで専門家の一対比較評価を繰り返し、最終的な各 SA, SI の重みを決定する。この作業には非常に煩雑且つ時間を要する困難を伴う<sup>7)</sup>ので、発展途上国であるベトナムにおいて、これを十分な経済的援助無しで実施することは困難である。そこで本研究では、著者らの先行研究で提案したシンプル AHP<sup>8)</sup>を用いて、簡易的に重み付けを行う。各アスペクト SA<sub>i</sub>に対する重み W<sub>A</sub>(i)及びそれに対応する指標 SI<sub>ij</sub>に対する重み W<sub>I</sub>(i,j)を次式(1), (2)で算定することとする。

$$W_A(i) = 1/N \quad (1) \quad W_I(i,j) = 1/N_i \quad (2)$$

制約条件：  $0 \leq W_A(i), W_I(i,j) \leq 1 \quad (3) \quad \sum_{i=1}^N W_A(i) = 1; \sum_{j=1}^{N_i} W_I(i,j) = 1 \quad (4)$

ここで、W<sub>A</sub>(i):アスペクト i に対する重み、W<sub>I</sub>(i,j):アスペクト i の指標 j に対する重み、N:アスペクトの個数、N<sub>i</sub>:アスペクト i の全指標数、(i=1...N, j=1...N<sub>i</sub>)

- (iii) 必要なデータを収集し、各指標値 x を算定する。次いで SIF を導入し、x を持続可能性指数 Ω<sub>I</sub>(x) に変換する。なお Ω<sub>I</sub>(x) は通常 0~1 の値として表現される。

SIF が線形(標準的な AHP)の場合の x と Ω<sub>I</sub>(x) の関係は式(5)で定義され、図-2 の直線として示される。一方 SIF が非線形の場合、x と Ω<sub>I</sub>(x) との関係は式(6)で定義し、それは図-2 の曲線として示される。この場合式(7)のように、x = x<sub>a</sub> のときの a の値を定める必要があるが、その値は意思決定者が対象とする持続可能性問題に対し適切に設定しなければならない。

$$\Omega_I(x) = x \quad (5) \quad \Omega_I(x) = ae^{\lambda x} + b \quad (6) \quad \Omega_I(x_a) = a \quad (7)$$

ここで係数 a, b, λ は式(6)において、式(7)の関係及び Ω<sub>I</sub>(0)=0, Ω<sub>I</sub>(1)=1 により、式(8)~(10)として決定される。

$$a = \frac{1}{e^{\lambda} - 1} \quad (8) \quad b = -\frac{1}{e^{\lambda} - 1} \quad (9) \quad ae^{\lambda} - a - e^{\lambda}a + 1 = 0 \quad (10)$$

- (iv) 各アスペクト SA<sub>i</sub> の持続可能性指数 Ω<sub>A</sub>(i) 及び、最終的な持続可能性指数 Ω はそれぞれ次式(11), (12)で算定される。

$$\Omega_A(i) = \sum_{j=1}^{N_i} W_I(i,j) * \Omega_I(i,j) \quad (11) \quad \Omega = \sum_{i=1}^N W_A(i) * \Omega_A(i) \quad (12)$$

なお、持続可能性指数(Ω<sub>I</sub>(x), Ω<sub>A</sub>(i), Ω)のレベルとしては、それぞれの指数の程度を表すための持続可能性レベルが以下のように 0~1 の範囲で分類されている。すなわち通常、0-0.2(劣悪), 0.2-0.4(低劣), 0.4-0.6(許容可), 0.6-0.8(良好), 0.8-1.0(優秀)の5段階に分類される。

4. ハノイ市地下水資源への適用

(1) 持続可能性アスペクトの選択

現実問題として、ベトナムでは高い水需要に対して水不足が報告されており<sup>9)</sup>、過剰な地下水取水により特にハノイ市中南部において深刻な地下水位低下が引き起こされている。また、ベトナムの地下水は自然・人工由来のヒ素、大腸菌、窒素・リン汚染が進行<sup>10),11)</sup>し、ペットボトルの水でさえ汚染されているものもある。そしてこれらの量的質的な問題に対し、適切な水資源管理を行うことが持続可能な開発に必要不可欠である。そこで本研究では、ハノイ市における地下水資源の社会的評価基準によるアスペクトとして、量的アスペクト(SA<sub>1</sub>)、質的アスペクト(SA<sub>2</sub>)、管理的アスペクト(SA<sub>3</sub>)の3つのアスペクトを提示する。

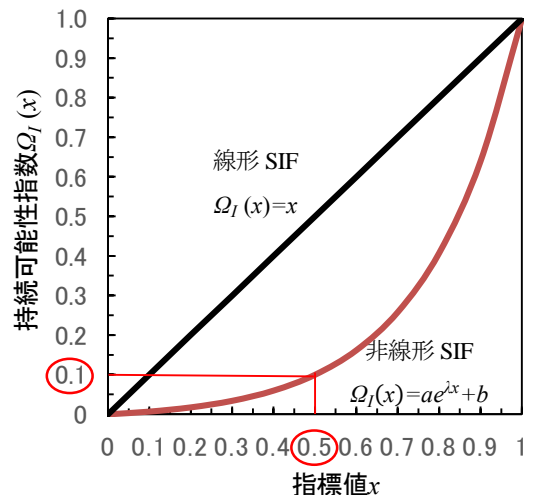


図-2 SIF のグラフ

表-1 各指標の評価項目とその算定式

アспект	指標	評価項目	算定式
量 SA <sub>1</sub>	SI <sub>11</sub>	社会的に十分な水使用	"少なくとも 130L/人日の量の水を使うことのできる人口"/全人口
	SI <sub>12</sub>	給水制限	1 - "給水制限の被害を受けた人口"/全人口
	SI <sub>13</sub>	給水制限日の給水時間	"給水制限日に公共用水を利用できた時間"/24h
質 SA <sub>2</sub>	SI <sub>21</sub>	ヒ素汚染	1 - "ヒ素に汚染された地下水を使うリスクがある人口"/全人口
	SI <sub>22</sub>	窒素汚染	1 - "窒素に汚染された地下水を使うリスクがある人口"/全人口
	SI <sub>23</sub>	大腸菌汚染	1 - "大腸菌に汚染された地下水を使うリスクがある人口"/全人口
	SI <sub>24</sub>	水関連の疾病	1 - "水関連の疾病に罹る人口"/全人口
管理 SA <sub>3</sub>	SI <sub>31</sub>	公共給水網	"公共用水の敷設範囲"
	SI <sub>32</sub>	需要と供給	"公共用水の供給"/"公共用水の需要"
	SI <sub>33</sub>	年間投資率	"水供給に関する年間投資額"/"水供給設備に対する年間価格"
	SI <sub>34</sub>	水の価格	1 - "月の水道料金"/"平均収入"
	SI <sub>35</sub>	支払意思水準	"水供給問題改善のための資金を払おうとする人口割合"
	SI <sub>36</sub>	参加意思水準	水保護・保全プログラムに参加する意思がある人口割合"

(2) 持続可能性指標の選択と定義

前節の3つのアспектに対し具体的に問題を精査し、それぞれの指標として選択する。SA<sub>1</sub>に関しては、水使用に対する社会満足度に着目し3個、SA<sub>2</sub>に関しては、水質の汚染状況及び水使用のリスクの高さについて着目し4個、SA<sub>3</sub>に関しては、公共水供給システムをどのように管理・改善するのかに着目し6個の総計13指標をハノイ市の社会的評価基準による地下水持続可能性指標として選択し、これらを表-1にまとめて示す。

5. 結果と考察

(1) SIF が線形の場合

ベトナム政府のデータベースと国内外の環境機関、研究機関、アンケート調査から必要なデータを収集することによって、前述したSIの値xを算定した。その結果を表-2の「指標値x」の欄に示す。次に式(1)、(2)を用いて算定されたそれぞれの重みを、表-2の「W<sub>A(i)</sub>」及び「W<sub>I(i,j)</sub>」欄に示す。そして指標値xを用いて式(5)よりΩ<sub>I(x)</sub>を算定した結果及びΩ<sub>I(x)</sub>、W<sub>A(i)</sub>、W<sub>I(i,j)</sub>を用いて式(11),(12)よりΩ<sub>A(i)</sub>、Ωを算定した結果を、表-2の「線形SIF」の「Ω<sub>I(x)</sub>」、「Ω<sub>A(i)</sub>」、「Ω」欄に示す。さらに図-3にはSIFが線形の場合の、Ω<sub>A(i)</sub>のレーダーチャートを破線で示し、さらに最終評価値Ωの値を破線の円として図示している。

表-2のSA<sub>1</sub>に対応する3つの指標を見ると、SI<sub>11</sub>は「優秀」、SI<sub>12</sub>及びSI<sub>13</sub>は「許容可」となり、Ω<sub>A(1)</sub>は「良好」と評価された。次にSA<sub>2</sub>に対応する4つの指標を見ると、いずれも「許容可」~「優秀」となり、Ω<sub>A(2)</sub>は「良好」と評価された。最後にSA<sub>3</sub>に対応する6つの指標を見ると、SI<sub>33</sub>及びSI<sub>36</sub>は「劣悪」であったが、その他のSI<sub>31</sub>、SI<sub>32</sub>、SI<sub>34</sub>、SI<sub>35</sub>は「許容可」~「優秀」となり、Ω<sub>A(3)</sub>は「許容可」と評価された。その結果、最終評価値Ωは「良好」となった。

表-2 重み付けと持続可能性評価結果

アспект	指標	指標値 x	W <sub>A(i)</sub>	W <sub>I(i,j)</sub>	線形 SIF			非線形 SIF		
					Ω <sub>I(x)</sub>	Ω <sub>A(i)</sub>	Ω	Ω <sub>I(x)</sub>	Ω <sub>A(i)</sub>	Ω
量 SA <sub>1</sub>	SI <sub>11</sub>	0.98	0.33	0.33	0.98	0.68	0.62	0.91	0.38	0.30
	SI <sub>12</sub>	0.55		0.33	0.55			0.13		
	SI <sub>13</sub>	0.50		0.33	0.50			0.10		
質 SA <sub>2</sub>	SI <sub>21</sub>	0.44	0.33	0.25	0.44	0.68	0.62	0.07	0.33	0.30
	SI <sub>22</sub>	0.57		0.25	0.57			0.14		
	SI <sub>23</sub>	0.78		0.25	0.78			0.37		
	SI <sub>24</sub>	0.93		0.25	0.93			0.73		
管理 SA <sub>3</sub>	SI <sub>31</sub>	0.68	0.33	0.17	0.68	0.50	0.62	0.24	0.20	0.30
	SI <sub>32</sub>	0.87		0.17	0.87			0.56		
	SI <sub>33</sub>	0.02		0.17	0.02			0.00		
	SI <sub>34</sub>	0.72		0.17	0.72			0.28		
	SI <sub>35</sub>	0.56		0.17	0.56			0.13		
	SI <sub>36</sub>	0.15		0.17	0.15			0.01		

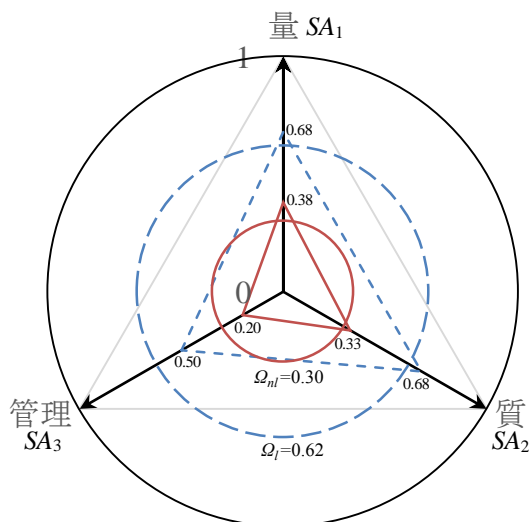


図-3 レーダーチャート

しかしながらこの結果は、ハノイ市の実際の地下水問題を適切に反映しているとは言い難い。例えば、 $SI_{21}$ に着目すると、その指数は0.44であり「許容可」と評価され、住民の半数以上(56%)が地下水利用によるヒ素中毒の危険性にさらされていることを示しているが、持続可能な社会という観点からは、持続可能性は「劣悪」か、少なくとも「低劣」と評価されるべきである。その他の質の観点でも同様のことが言えよう。

## (2) SIF が非線形の場合

3. (2)で述べたように、SIF が非線形の場合は、 $x_a$ 及び $\alpha$ の値を意思決定者が対象とする持続可能性問題によって設定し、係数 $a$ ,  $b$ ,  $\lambda$ を決める必要がある。本研究では簡単のため条件式(7)で $\Omega_I(0.50) = 0.1$ と設定し、簡便的に全ての指標に対しこれを適用することとする。すなわち式(13)より持続可能性指数 $\Omega_I(x)$ を算定する。本設定により、もしハノイ市住民の50%がヒ素汚染の危険性にさらされているのであれば、その持続可能性指数は0.1(劣悪)と評価されることとなる。SIF が線形の場合と同様に各持続可能性指数を算定した結果を表-2の「非線形 SIF」の「 $\Omega_I(x)$ 」, 「 $\Omega_A(i)$ 」, 「 $\Omega$ 」欄に示し、また図-3に3つのアスペクト値 $\Omega_A(i)$ 及び、最終評価値 $\Omega$ を実線で図示している。

$$\Omega_I(x) = 0.0125e^{4.3944x} - 0.0125 \quad (13)$$

表-2より、SIF が線形の場合と比較してほぼ全ての $\Omega_I(x)$ が劇的に減少していることがわかる。 $SA_1$ では、とりわけ $SI_{12}$ ,  $SI_{13}$ の2つの持続可能性レベルが「許容可」から「劣悪」へと2ランク下がり、 $\Omega_A(1)$ は「低劣」と評価されている。同様に $SA_2$ では、 $SI_{21}$ 及び $SI_{22}$ は「許容可」から「劣悪」、 $SI_{23}$ は「良好」から「低劣」へと持続可能性レベルが2ランクずつ下がり、 $\Omega_A(2)$ は「低劣」と評価されている。そして $SA_3$ においても、殆どの指標( $SI_{31}$ ,  $SI_{33}$ ,  $SI_{34}$ ,  $SI_{35}$ ,  $SI_{36}$ )が「低劣」または「劣悪」となり、 $\Omega_A(3)$ は「劣悪」と評価されている。以上より最終的な持続可能性指数 $\Omega$ は持続可能性レベルが「良好」から「低劣」へと2ランク下がった。これらの結果は、ハノイ市における地下水の過剰取水や汚染環境とそれに伴う社会的悪影響を適切に捉えていると考えられ、線形 SIF よりも非線形 SIF の方が現況反映性が高いと言える。

## 6. むすび

本研究では、持続可能性指数関数 SIF を導入することで標準的な AHP を修正した SIF-AHP を提案し、ハノイ市の社会的評価基準による地下水持続可能性を評価した。まず当該地域における地下水の持続可能性の現状を適切に捉えるために、量・質・管理の3つの持続可能性アスペクトを提示し、それらに対応する総計13個の持続可能性指標を具体的に選択した。そして SIF が線形及び非線形の場合の持続可能性指数を算定し、比較・検討を行った。その結果 SIF が非線形の場合、持続可能性レベルが2ランク程度低く評価され、ハノイ市の現況がより適切に反映されたものと考えられる。本研究で提示した持続可能性評価のフレームワークは、今後の発展途上国における社会的評価基準による地下水持続可能性評価手法として参照されると期待されるが、今後は SIF-AHP の各係数を指標ごとに設定する方法や、より適切な重み付け方法について検討していく必要がある。

### 参考文献

- 1) Tong, T.N.: Establishing integrated water resources database for effective management in Hanoi, *The final project report*. Northern Division of Water Resources Planning and Investigation (In Vietnamese), 2008.
- 2) Bui, D.D., Kawamura, A., Tong, T.N., Amaguchi, H. and Nakagawa, N.: Spatio-temporal analysis of recent groundwater-level trends in the Red River Delta, Vietnam. *Hydrogeo. J.*, Vol.20, pp.1635-1650, 2012.
- 3) Bui, T.N., Kim, K.W., Prathumratana, L., Lee, A., Lee, K.Y., Kim, T. H., Yoon, S.H., Jang, M. and Bui, D. D.: Sustainable Development in the Mining Sector and Its Evaluation Using Fuzzy AHP Approach. *Geosyst. Eng.*, Vol.14, Pt.1, pp.43-50, 2011.
- 4) Sun, S., Wang, Y., Liu, J., Cai, H., Wu, P., Geng, Q. and Xu, L.: Sustainability assessment of regional water resources under the DPSIR framework. *J. Hydrol.*, Vol.532, pp.140-148, 2016.
- 5) 下崎仁大, 河村明, 天口英雄, Nuong Thi Bui : ベトナム・ハノイにおける地下水資源の環境持続可能性評価について, 第44回土木学会関東支部技術研究発表会公演概要集, CD-ROM 版(IV-41), 2017.
- 6) Tong, T.N.: Establishing integrated water resources database for effective management in Hanoi, *The final project report*. Northern Division of Water Resources Planning and Investigation (In Vietnamese), 2008.
- 7) Saaty, T.L.: *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory*. Pittsburgh. RWS Publications, PA, 2000.
- 8) Bui, T.N., Kawamura, A., Amaguchi, H., Bui, D.D. and Truong, N.T. : Environmental Sustainability Assessment of Groundwater Resources in Hanoi, Vietnam by a Simple AHP Approach. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.G (environmental Reserch)*, Vol.72, No.5, pp.I\_137-I\_146, 2016.
- 9) HAWACO, Hanoi Water Limited Company, 2016. Temporary Water Shut-off Schedule. <http://hawacom.vn/?cat=67> (accessed 16.10.20).
- 10) Berg, M., Nguyen, T.C., Pham, H.V., Schertenleib, R. and Giger, W., 2001. Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam: a human health threat. *Environ. Sci. Technol.* 35(13), 2621-2626. <http://dx.doi.org/10.1021/es010027y>.
- 11) Bui, D.D., Bui, N.T., Hoang, H.A., Do, T.H. and Bui, D.D., 2007. Research on the groundwater pollution and its effect on the community health in Hanoi, Vietnam with the supports of GIS and Mathematical model. Proc. of the International workshop on Bio-Medicine, Hanoi, Vietnam, 338-345.