

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

首都大学東京	都市環境科学部	学生員	○下崎	仁大
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では、近年の急速な経済発展、社会成長、都市化等により流域環境が悪化し、また、下水道システムの整備もハノイ市では遅れており、工業、農業、水産業、家庭排水等はほとんど処理されずに直接河川に排出されているため、表流水は有機化合物等によって汚染され、特に湖は著しく汚染されている。そのため、地下水資源がハノイの主要な水供給源となっている。しかしながら、地下水取水は適切に管理されておらず、大量の地下水取水により浅井戸の涸渇や地下水位の低下、地盤沈下等の種々の有害な影響が生じている¹⁾²⁾。地下水取水は社会活動の為に必要であるが、社会や環境に有害な影響を及ぼさない取水方法が持続可能な地下水管理のためには不可欠である。ハノイの地下水の揚水量、地下水位の低下のような量に関する直接的な問題やヒ素や大腸菌、窒素・リン等による汚染に関する個別の研究は過去に数多くなされているが、ベトナムにおいては、地下水資源に対する環境持続可能性の評価に関する研究はこれまでにない。持続可能性を評価する上で、最も適切な手法として考えられているのが多基準意思決定(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)手法である³⁾。その1つである階層分析法(Analytic Hierarchy Process, 以下「AHP」と記す)は鉱業⁴⁾、地域水資源⁵⁾等多数の分野に適用され、様々な持続可能性評価に利用されている。しかしながら、地下水資源の持続可能性評価を扱った研究は少なく、特にベトナムのような熱帯モンスーン地域の地下水資源を対象とした研究はこれまでに見受けられない。持続可能性という観点では通常、経済、環境そして社会という3つの評価基準が用いられている⁶⁾。本研究ではこの内、ハノイにおける地下水資源の環境評価基準に対する持続可能性指標を具体的に提案し、それらの指標に基づく地下水資源の環境持続可能性評価(Environmental Sustainability Assessment, 以下「ESA」と記す)を行った。この場合、利用可能なデータが限られていることを考慮し、AHPを単純化したシンプルAHPを提案し、熱帯モンスーン地域での最初の事例研究としてハノイに適用する。

2. 対象地域

地下水資源の持続可能性評価の対象とするハノイは図-1に示すように、ベトナムの北東に位置し面積は3324.5 km²であり30の行政区からなる。2015年時点での人口は750万人であり、ベトナムの全人口の10%を占めている。ハノイは熱帯モンスーン地域に属しており、1年間の内、雨期(5~10月)、乾期(11~4月)という2つの特徴的な季節を有する。年間降雨量はおよそ1600 mm、平均湿度およそ80%、平均気温およそ24.3℃、蒸発量は年間933 mmと極めて高い⁷⁾。また、密集した河川網(0.7 km/km²)を有しており、それらは主に紅河水系と連結されている。

3. 環境持続可能性評価(ESA)手法

(1) 標準的なAHP

AHPをESA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、持続可能性を持続可能性アспект(Sustainability Aspect, 以下「SA」と記す)に分類し、各アспектは、いくつかの持続可能性指標(Sustainability Indicator, 以下「SI」と記す)から構成される。標準的なAHPをESAに適用するための手順としては通常次に示す3つの段階が必要である。

- (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研究を行い、持続可能性に寄与する主要なSIのリストを抽出する。
- (ii) 専門家の意見を求め、各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。

各アспект*i*に対する環境持続可能性指数SA_{*i*}および総合環境持続可能性指数Sはそれぞれ式(1),(2)によって算定される。



図-1 対象地域のハノイ市

キーワード ハノイ, 地下水資源, 環境持続可能性評価, AHP, 持続可能性指標

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: simozaki-masahiro@ed.tmu.ac.jp

$$SA_i = \sum_{j=1}^{N_i} W_{ij} * SI_{ij} \quad (1) \quad S = \sum_{i=1}^N WA_i * SA_i \quad (2)$$

ここに、 N : アスペクトの個数, N_i : アスペクト i に対する指標の個数 ($i=1 \dots N$), WA_i : アスペクト i の重み, SI_{ij} : アスペクト i に対する j 番目の指標値 ($j=1 \dots N_i$), W_{ij} : アスペクト i に対する j 番目の指標の重み.

重み WA_i, W_{ij} については式(3),(4)の関係を満たし, また, 指標値 SI_{ij} , 持続可能性指数 SA_i, S は式(5)を満たす.

$$0 \leq WA_i, W_{ij} \leq 1 \quad (3) \quad \sum_{i=1}^N WA_i = 1; \quad \sum_{j=1}^{N_i} W_{ij} = 1 \quad (4) \quad 0 \leq SI_{ij}, SA_i, S \leq 1 \quad (5)$$

標準的な AHP では, 各 SA, SI の重みは通常, 持続可能性評価のための何名かの専門家に対して, 全ての SA, SI の組み合わせについて一対比較による評価を行うためのアンケートの配布・回収を行い, その回答に基づいて決定される.

本研究では地下水の持続可能性(S, SA_i, SI_{ij})の尺度として, それぞれの指標の状況を表わすための持続可能性尺度を以下のように 0~1 の範囲で分類する. すなわち, 劣悪(0 - 0.2), 低劣(0.2 - 0.4), 許容可(0.4 - 0.6), 良好(0.6 - 0.8), 優秀(0.8 - 1.0)の 5 段階に分類する.

(2) シンプル AHP

前節の専門家へのアンケートによる重みの決定における問題点として, 多大な労力と時間を要することが指摘されている⁸⁾. また, 本研究において利用可能なデータも限られており, ここでは, 標準的な AHP を簡易化し, 各アスペクトおよび指標の重み付けの方法を次のように単純化した「シンプル AHP」を提案する. シンプル AHP は専門家へのアンケートを必要とせず, 持続可能性アスペクトの個数(N)と各アスペクト i に対する持続可能性指標の個数(N_i)の機能により重み付けを行う. 本研究では簡単のため, まず各 SA, SI に対し均等の重み付けとする. すなわち, 各アスペクト SA_i の重み WA_i とそれに対応する指標 SI_{ij} の重み W_{ij} を次式で算定することとする.

$$WA_i = 1/N \quad (6) \quad W_{ij} = 1/N_i \quad (7)$$

4. シンプル AHP による環境持続可能性評価 (ESA)

(1) アスペクト及び指標の選択

環境持続可能性評価のためには, 現実的な問題の考察に基づいて, SA と SI を慎重に選択する必要がある⁹⁾. 本研究では, アスペクトとしては, 地下水の量的アスペクト(SA_1), 質的アスペクト(SA_2), 管理的アスペクト(SA_3)の 3 つのアスペクトを提示する. 各アスペクトに対する指標としては, データの存在等を考慮し, 表-1 に示すように SA_1 には 2 個, SA_2, SA_3 には 4 個ずつの合計 10 個の指標を提示する. 表-1 には指標の計算式と実際に指標を算定する際に用いた値を併記している. 量的アスペクト(SA_1)に関しては, 地下水の取水, 涵養そして利用可能な地下水資源に着目して指標を選択し, それらの値を算定した. 質的アスペクト(SA_2)に関する指標としては, 最近報告されている地下水汚染の現状に基づき, ヒ素汚染, 窒素汚染, 大腸菌汚染の 3 つの汚染¹¹⁾に関する指標及び地下水の浄水処理必要性に関する指標の計 4 つを選択した. なおこれらの値は, 汚染地域の全地域に対する比として単純に計算されることが多い¹⁰⁾. 管理的アスペクト(SA_3)に関しては, ハノイの有害事象として報告されている過剰取水, 地下水位の低下, 地盤沈下, 塩水化の 4 つの指標を選択し, SA_2 と同様に問題地域の対象地域に対する比として通常計算される.

(2) 適用結果及び考察

政府のデータベースとベトナムの天然資源環境省から必要なデータを収集することによって, 前述した環境持続可能性指標の値を計算した結果を表-1 の「指標値」の欄に示す. 次に, 式(6),(7)を用いたシンプル AHP によって算定された重みを, 表-2 の「 WA_i 」及び「 W_{ij} 」欄に示す. そして, 表-1 の指標値 SI_{ij} , 表-2 の WA_i, W_{ij} を用いて, 式(1),(2)より SA_i, S を算定した結果を表-2 のケース A 欄の「 SA_i 」及び「 S 」欄に示す. また図-2 には, このケース A による 3 つのアスペクトに対するレーダーチャートを示している. 表-1 の量的アスペクト(SA_1)に対応する 2 つの指標値を見ると, SI_{11} の値 (0.29) より涵養量に対する取水量における持続可能性は「低劣」であるが, SI_{12} の値 (0.71) から利用可能な地下水資源量に対する取水量としては「良好」と算定された. 次に質的アスペクト(SA_2)に対応する 4 つの指標値を見ると, ヒ素, 窒素, 大腸菌汚染されていない地域が 5 割を上回っているため, 持続可能性は「許容可」または「良好」と算定されているが, 実際にはハノイの地下水質問題は深刻な状況にあり, ハノイの地下水の質的な持続可能性を適切に反映していないと考えられる. 管理的アスペクト(SA_3)に対応する 4 つの指標値を見ると, 地下水に関する問題が発生していない地域は 9 割を上回っており, 持続可能性は「優秀」とかなり高い値として算定された. その結果, 表-2 に示すように, SA_1 は「許容可」, SA_2 は「良好」, SA_3 は「優秀」と評価され, 総合環境持続可能性指数 S も「良好」とであると評価された.

表-1 各指標の計算式, 使用した変数と説明

アスペクト	指標	計算式(x)	使用した変数とその説明	指標値
量的 アスペクト SA ₁	SI ₁₁	1-(総地下水取水量)/(総地下水涵養量)	<ul style="list-style-type: none"> 総地下水取水量: 1,799,562 m³/day¹²⁾ 涵養量の概算: 276 mm/year (917,562,000 m³/year)¹²⁾ 	0.29
	SI ₁₂	1-(総地下水取水量)/(利用可能な地下水資源量)	<ul style="list-style-type: none"> 総地下水取水量: 1,799,562 m³/day¹²⁾ 利用可能な地下水資源量: 6,199,140 m³/day¹²⁾ 	0.71
質的 アスペクト SA ₂	SI ₂₁	(地下水がヒ素汚染されていない地域)/(対象地域)	主要な帯水層の約 43% のサンプルがベトナムのヒ素汚染の基準値である 0.01 mg/l ¹¹⁾ を上回っている.	0.57
	SI ₂₂	(地下水がアンモニウム、亜硝酸塩、硝酸塩汚染されていない地域)/(対象地域)	サンプルの約 43% がアンモニウム、約 15% が亜硝酸塩、約 12% が硝酸塩汚染されており、飲料水として適さない ¹¹⁾ .	0.57
	SI ₂₃	(地下水が大腸菌汚染されていない地域)/(対象地域)	両帯水層のサンプルの約 22% がハノイの基準値を上回る大腸菌群数を含んでいる ¹¹⁾ .	0.78
	SI ₂₄	(地下水の浄水処理が必要の無い地域)/(対象地域)	地下水のおよそ 41%、33%、22% がそれぞれヒ素、窒素、大腸菌群数の基準値を上回っているため、処理される必要がある ¹¹⁾ .	0.59
管理的 アスペクト SA ₃	SI ₃₁	(地下水の過剰取水が発生していない地域)/(対象地域)	SI ₃₂ の説明を参照	0.91
	SI ₃₂	(地下水の過剰取水による地下水位の低下が発生していない地域)/(対象地域)	<ul style="list-style-type: none"> 対象地域: 3324.5(km²) 地下水位が低下している地域: 30.25(km²)^{13),14)} 	0.91
	SI ₃₃	(地下水の過剰取水による地盤沈下が発生していないまたは発生する可能性のない地域)/(対象地域)	<ul style="list-style-type: none"> 対象地域: 3324.5(km²) 地盤沈下が発生している, または, 発生が予想される地域: 30.92(km²)¹³⁾ 	0.93
	SI ₃₄	(地下水の過剰取水による塩水化が発生していない地域)/(対象地域)	<ul style="list-style-type: none"> 対象地域: 3324.5(km²) 地下水の塩水化は発生していない¹⁵⁾. 	1.00

表-2 アスペクトと指標の重み付けと持続可能性評価結果

アスペクト	WA _i	指標	W _{ij}	ケース A			ケース B		
				SI _{ij}	SA _i	S	SI _{ij}	SA _i	S
SA ₁	0.333	SI ₁₁	0.50	0.29	0.500	0.688	0.29	0.500	0.545
		SI ₁₂	0.50	0.71			0.71		
SA ₂	0.333	SI ₂₁	0.25	0.57	0.628	0.688	0.14	0.200	0.545
		SI ₂₂	0.25	0.57			0.14		
		SI ₂₃	0.25	0.78			0.37		
		SI ₂₄	0.25	0.59			0.15		
SA ₃	0.333	SI ₃₁	0.25	0.91	0.938	0.688	0.91	0.938	0.545
		SI ₃₂	0.25	0.91			0.91		
		SI ₃₃	0.25	0.93			0.93		
		SI ₃₄	0.25	1.00			1.00		

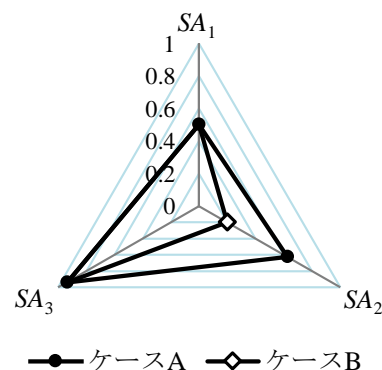


図-2 3つのアスペクトに対するレーダーチャート

(3) 指標の新たな算定方法

前節(4, (2))では, 表-1 の計算式(x)とそれに基づく指標値は線形関係としている. すなわち, 計算式(x)と指標値が図-3のケース A で算定される. 例えば質的アスペクト(SA₂)について, 地下水が汚染されている地域が対象地域の5割を占めても, その指標値は0.5, すなわち持続可能性は「許容可」と示される. しかしながらこの関係は, ハノイの地下水汚

染状況を的確には反映していないと考えられる。そのため、ここでは計算値と指標値の関係を図-3のケース B のような非線形な関係を提案し、質的アスペクト(SA₂)に適用する。本研究では例えば、計算値が 0.5 のとき指標値が 0.1 として持続可能性を評価してみよう。表-2 及び図-2 の「ケース B」にその結果を示す。

表-2 のケース B より、質的アスペクト(SA₂)はケース A の「良好(0.628)」から「劣悪(0.200)」と評価される。この SA₂に対応する 4 つの指標値を見ると、ヒ素・窒素汚染及び浄水処理必要性に関する指標 SI₂₁, SI₂₃, SI₂₄は「許容可」から「劣悪」へ、大腸菌汚染に関する指標 SI₂₃は「良好」から「低劣」へと持続可能性評価が低くなり、ハノイの地下水の汚染状況を適切に示していると考えられる。その結果、非線形な関係を適用した総合環境持続可能性指数 S の評価は、「良好(0.688)」から「許容可(0.545)」となり、従来の線形関係を適用した場合と比較して、ハノイにおける地下水持続可能性の現状をより適切に反映しており、現実的であると考えられる。

5. むすび

本研究では、AHP を用いてモンスーン地域であるハノイの地下水の環境持続可能性を評価するための枠組みと評価手法を提示した。その枠組みの中で、量的・質的・管理的の 3 つのアスペクトを提案し、各アスペクトに対応する具体的な合計 10 個の指標を提示した。次に、利用可能なデータの制約及び標準的な AHP の重みを決定する際の労度削減手法としてシンプル AHP を提案し、それを用いてハノイの地下水資源の環境持続可能性を評価した。その結果、質的アスペクト(SA₂)には対象地域の地下水汚染状況が適切に反映されておらず、その原因としてデータから計算される値と指標値が線形関係となっていることを指摘した。そこで、それらの関係を非線形関数とし、SA₂に適用した結果、評価値は、従来の線形関係と比較してハノイの地下水の実際の汚染状況を適切に反映しており、現実的な評価結果が得られた。今後は、ハノイの地下水資源に対して経済・社会の評価基準からも持続可能性を評価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) Shen, L., Muduli, K. and Barve, A.: Developing a sustainable development framework in the context of mining industries: AHP approach. *Resour. Policy J.*, Vol.46, pp.15-26, 2015.
- 5) 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.
- 6) Brundtland, G.H.: *Our Common Future*. Oxford University Press, 1987.
- 7) 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.
- 8) Saaty, T.L.: *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory*. Pittsburgh. RWS Publications, PA, 2000.
- 9) Chen, J., Zhang, Y., Chen, Z. and Nie, Z.: Improving assessment of groundwater sustainability with analytic hierarchy process and information entropy method: a case study of the Hohhot Plain, China. *Environ. Earth Sci.*, Vol.73, pp.2353-2363, 2015.
- 10) Vrba, J. and Lipponen, A.: Groundwater resources sustainability indicators. *IHP-Viseries on groundwater*, No.14, 2007.
- 11) Nguyen, T. T., Kawamura, A., Nakagawa, N., Amaguchi, H. and Gilbuena, R. : An overview of groundwater quality in Hanoi, Vietnam. *Proc. of the 39th Kanto Branch Annual Conference of JSCE*, CD-ROM, II-16, 2012.
- 12) Bui, T.N., Kawamura, A., Amaguchi, H., Bui, D.D. and Truong, N.T.: Current situation of groundwater abstraction in Hanoi, Vietnam from the viewpoint of sustainability. *2015 Kanto Branch of Japan Society of Civil Engineers and Tokyo City University*, VII-12, 2016.
- 13) Phi, T.H. and Strokova, L.A.: Prediction maps of land subsidence caused by groundwater exploitation in Hanoi, Vietnam. *Resour-Efficient Technol.*, 2015.
- 14) Bui, T. N., Sthiannopkao, S., Kim, K.W. and Bui, D.D.: Prevalence of Arsenic in groundwater resources in Hanoi2, Vietnam. *SEGH 2010 International Conference and Workshops of the Society for Environmental Geochemistry and Health on Environmental Quality and Human Health*, Galway, Ireland, pp.51-52, 2010.
- 15) Dang, H.O.: Groundwater exploitation potential and saltwater intrusion prediction for My Xuan pumping field (Ba Ria-Vung Tau). *Proc. of the 12th conference of Hanoi University of Mining and Geology*, 1996.

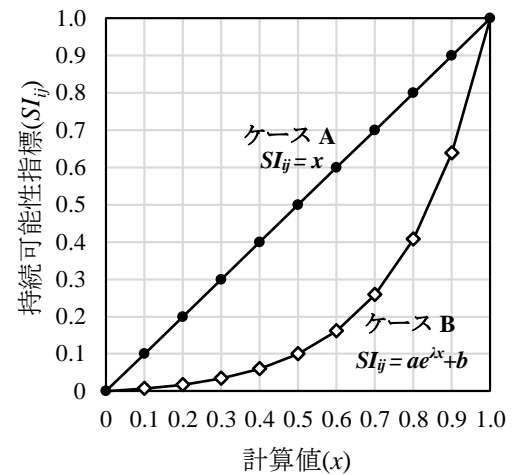


図-3 計算値と指標値の関係