

# 計画段階での活用を想定した地熱発電所の 景観評価手法

久保 拓巳<sup>1</sup>・福井 恒明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 法政大学大学院修士課程 デザイン工学研究科 都市環境デザイン工学専攻  
(〒102-8160 東京都千代田区富士見2-17-1, E-mail: takumi.kubo.3t@stu.hosei.ac.jp)

<sup>2</sup>正会員 法政大学教授 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科  
(〒102-8160 東京都千代田区富士見2-17-1, Email: fukui @hosei.ac.jp)

再生可能エネルギーの導入促進に向けて、環境省は2012、2015年に国立・国定公園内の地熱開発に関する規制を緩和した。開発要件のひとつとして特段の取り組みをした優良事例であることが示されているが、優良事例の形成のための技術や手法は確立されていない。本研究では、地熱発電所の設計項目のうち計画当初に検討が必要な事項を対象に、地熱発電所周辺の視点からの眺望を再現したCG画像による評価実験からその傾向を明らかにすることを目的とする。階層分析法（AHP）を用いて分析することにより各評価項目における景観への重みを算出し、評価傾向を把握するとともに視距離の違いによる影響の変化についても考察した。

**キーワード:** 地熱発電所, 階層分析法 (AHP), 景観評価, 自然環境, 風致景観

## 1. はじめに

### (1) 研究背景・目的

現在、日本のエネルギー政策では安定的な発電を見込める再生可能エネルギーの確保の観点から地熱発電の推進が期待されている。日本は豊富な地熱資源に恵まれているが、そのほとんどが国立・国定公園内に存在し、景観や自然環境保護の観点から地熱開発は規制されてきた。しかし、2011年に発生した東日本大震災、福島第一原子力発電所の事故以降、再生可能エネルギーへの期待が高まっている。こうした状況を受け、2012年に環境省から通知<sup>1)</sup>が出され、国立・国定公園内の第2種及び第3種特別地域において特段の取り組みをした場合にのみ地熱開発が可能となった。さらに、2015年の通知<sup>2)</sup>では、第1種特別地域について地表に影響がないことなどを条件に地下部への傾斜掘削が認められた。また、建築物の高さについても風致景観への著しい支障が回避され、風致景観との調和が図られる場合に限り、従来の規制値であった13mにとらわれずに建設できるとの規制緩和がなされた。これらの通知では、開発要件のひとつとして自然環境、風致景観及び公園利用への影響を最小限にとどめるための技術や手法を投入した「優良事例」であることを建設の条件としている。しかし、その具体的な技術や手法は確立されておらず、どのように考えればよいか課題となっている。そのため、「優良事例」の形成のための技術や手法について検討する必要がある。現在、優良事例

の形成のための有効な手法の1つとして、エコロジカル・ランドスケープデザイン手法が挙げられている。エコロジカル・ランドスケープデザイン手法<sup>3)</sup>とは、地域の潜在能力を借りてその地域でなければ成しえない環境を保全・創出するデザイン手法である。造成規模の縮小や地域の生態系・水循環の保全により自然環境、風致景観に配慮した施設の実現が期待されている。

本研究では、計画当初に検討が必要な事項（造成規模・建屋高さ・冷却塔配置）を対象に一般被験者に対する評価実験を行い、景観への影響の大きい項目や具体的な設計内容についての評価傾向を把握するとともに視距離の違いによる影響の変化について考察する。

### (2) 既往研究

地熱発電所の景観評価を行った研究として、小柴ら<sup>4)</sup>が日本国内の地熱発電所を対象に景観評価手法の現況と動向を整理し、電気事業者へのヒアリング調査から近年の日本国内の発電所整備時における施設デザインの傾向を示しているが、景観への配慮の効果を定量的に評価するには至っていない。また、津波倉ら<sup>5)</sup>は、国立・国定公園内に立地する地熱発電所周辺の訪問者を対象にヒアリング調査を行い、その結果から発電所の認知度、景観評価の実態及びその要因を明らかにしている。地熱開発において景観上留意すべき点を考察しているが成果の範囲は調査対象とした事例に限られている。これらの既往研究は、地熱発電所を対象にした研究あるものの定性的

なものであり、事後的な評価に留まっている。

Ostman<sup>9)</sup>は構想・計画段階における地熱発電所の計画・設計に対する評価手法を提案しており、比較的広域的な範囲から景観への影響度について検討している。土地の分断 (fragmentation) , 地熱発電所施設が占める面積 (surface area) , 主要道路から見える地熱発電所施設の割合 (visibility) など6項目についてそれぞれ影響度に応じた水準分けをしているが、その際の指標は研究者が独自に設定したものであり、項目の景観に対する重みは考慮されず、すべて同等に扱われている。また視点を想定した眺望については考慮されていない。

地熱発電所に関する研究としては近年の地熱開発関係の状況の変化に対してその内容を整理した研究が多く見られるが、ほとんどの既往研究が具体的な事例に対する事後的な景観評価にとどまっている。計画・設計段階における景観評価の枠組みの設定について提示された研究はなく、計画・設計の内容に反映しうる手法の提案もほとんどなされていない。

### (3) 研究の方法

地熱発電所施設が景観へ与える影響を定量的に評価するために階層分析法を用いた一対比較アンケートによる評価実験を行い、各評価項目及びその水準の重みを算出する。評価実験の際に地熱発電所施設に関して文字による一対比較は困難であることから、被験者へ評価構造を視覚的に明示できるよう刺激画像を作成する。刺激画像の表現方法にはフォトモンタージュやCG画像などが挙げられる。本研究では、自由な視点からの景観検討が行えること、完成後に近いイメージを作り上げることが可能なCG画像を刺激画像として用いる。

## 2. 地熱発電所の景観評価構造

### (1) 地熱発電所施設の景観評価項目と水準

地熱発電所は、発電所本館建屋 (タービン建屋) や復水器、冷却塔、原水タンク、坑井基地、施設と坑井基地を繋ぐ配管 (パイプライン) などによって構成されている。その他に管理用の道路や修景や外部環境との緩衝を目的とした植栽帯や調整池などが整備されている。

地熱発電所施設に関する景観評価項目としては造成・植栽・施設規模・色彩等さまざまなものが考えられる。計画・設計の初期段階において、景観配慮の効果が期待できるのは造成や施設の規模・配置であると考えられる。評価項目を抽出するにあたり、地熱発電所設計に関する文献調査を行った。

環境省の「国立・国定公園内における地熱開発に係る通知見直しに向けた基本的考え方」<sup>7)</sup>によれば、発電所

は平面的な広がりが必要となり、平均的には10~30ha前後の敷地が樹林等の伐開を伴い造成されるため、景観構成要素である自然植生等に著しい影響を与えることは避けられない。また、出力の維持または回復のために追加の生産井等の掘削が必要となり、操業後も造成による風致景観への影響は増大する機会が多いため、操業直後の造成規模を可能な限り抑えることが重要である、とされている。つまり、地熱発電所の立地の際には、造成に関する検討が必要である。また、2015年の環境省からの通知<sup>2)</sup>により、優良事例として判断される場合に限り13mを超えた建物の建設が認められている。地熱発電所施設の中で最も高さが高くなるタービン建屋は風致景観への考慮が必要であると考えられる。また、先行研究<sup>8)</sup>の現地調査から、遠方から地熱発電所を見たときに冷却塔からの白煙が目立つことが分かっている (写真-1)。白煙の形状・存在感はその発生源となる冷却塔のセル配置に関連すると考えられる。以上のことから、「造成規模」、「建屋高さ」、「冷却塔配置」の3つを評価項目として定めた。評価項目ごとに景観への影響を考慮した代替案 (水準) を3つ定めた (表-1)。



写真-1 遠景から白煙が目立つ地熱発電所の事例

#### a) 造成規模

地熱発電所の立地の際には造成に関する検討が重要であることから地形改変の程度を評価項目とした。水準は、地形改変が大きい順に、まとまった平場を確保し、平面的な法面を用いる一般的な造成手法の「一般土木」、ラウンディングにより法面部分が縮小された造成方法の「法面縮小」、エコロジカル・ランドスケープ手法を用いて尾根を保全した造成方法の「尾根保全」とした。

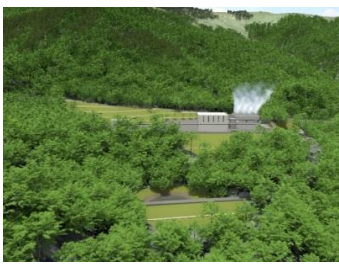








#### b) 建屋高さ

建屋高さは地熱発電所施設の中で最も高さが高くなるタービン建屋の存在感を表す指標として採用した。国内にある地熱発電所のタービン建屋高さを参考に水準を高さ「20m」、「16m」、「12m」とした。

#### c) 冷却塔配置

冷却塔のセル配置によって白煙の形状や存在感が変化

表-1 評価項目と水準

造成規模		建屋高さ		冷却塔配置	
一般土木		20 m		長辺配置	
法面縮小		16 m		並列配置	
尾根保全		12 m		短辺配置	

することから、冷却塔のセル配置を評価項目とした。水準は、見かけ上の白煙の幅が大きく存在感が大きい順に、視線に対してセル配置の長手方向となる「長辺配置」、セルを2列に配置した「並列配置」、視線に対してセル配置の短手方向となる「短辺配置」とした。

(2) 視距離による景観評価の考慮

対象の見えの大きさは視点から対象までの距離によって異なる。また、地熱発電所の立地特性から視距離による評価の変化についても考慮する必要があると考える。

樹木を対象とした視距離の分割では、340~460mを境界に近景域・中景域が分割され、2.1~2.8kmを境界に中景域・遠景域が分割される<sup>9)</sup>。本研究では、CG画像を2つのスクリーンに提示するため、実際の視覚よりも解像度が低くなることを考慮し、視距離の水準を近景を300m、中景を750m、遠景を1200mとした。

3. 評価実験

(1) 実験の目的・概要

一般の被験者を対象に二対比較アンケート実験を行い、その結果をもとに各評価項目、水準の重みを算出するこ

とで評価傾向を把握し、考察を行う。

前章で示した評価項目とその水準及び距離について、20代から60代の男女70名を対象に階層分析法による評価実験を行った。評価実験では、被験者集団に対しスクリーンに比較するCG画像を提示し、二対比較アンケート実験を実施した。なお、被験者に関しては各年代・性別で均等になるよう調整した(表-2)。

表-2 被験者の内訳

	男性	女性	合計
20代	7	7	14
30代	7	7	14
40代	7	7	14
50代	7	7	14
60代	7	7	14
合計	35	35	70

(2) CG画像の作成

評価実験では、評価項目とその各水準に対応したCG画像を作成した。CG画像は観光や登山の目的で自然の風景を見に来て、ある場所から風景を見ていると想定して作成している。CG画像の作成にあたり、地形データは国土

地理院基盤地図情報の数値標高モデルより代表点周辺の5mメッシュ地形情報（DEM）を取得し，得られた点データに対してIPS社の3次元地形作成ソフト（GeoForm）を用いて三角網計算を実施した。

次に，AutoDesk社3dsMAXを使用して3DCGモデルを作成する．3次元地形作成ソフト（GeoForm）で得られた三角網計算結果を3dsMAXに入力し，地形を生成した．その地形に対して，環境省自然環境局生物多様性センターによる自然環境保全基礎調査項目，植生調査（植生自然度調査）による1/25,000現存植生図（平成11年～）として提供されている情報を参考に植物モデルを配置した．また，CG画像の画角は人間の視野角を考慮し60度として設定した．以上の手順からCG画像を作成した．

### (3) 実験詳細

評価実験は，被験者前方左右のスクリーンに映し出される2枚のスライドにCG画像を提示して，どちらの方が目立つかを17尺度で評価する方法で実施した．CG画像は評価項目，水準に対応した27枚の画像を作成した（図-1～3）．評価項目間の影響度を問う質問の場合には，3つの水準を順に変化する動画像を作成し，提示することで一対比較を簡易化した．

実験は全2回行い，1回につき3会場で同時に行った．また，CG画像を投影するスクリーンの視認性を考慮し，1会場あたりの被験者数は12名とした．一対比較アンケートの回答方法に関する理解を促すため，事前に例題や回答例をスライドで提示し，回答方法の説明を行った．また，被験者が把握する情報を統一するため，実験の概要説明・質問時の言い回しに差異が生じないように原稿を作成し，原稿に則った進行を行った．被験者にはある地域へ来訪した際に自然風景を見に行くことを想定して回答してもらった．



図-1 CG画像例（近景）



図-2 CG画像例（中景）

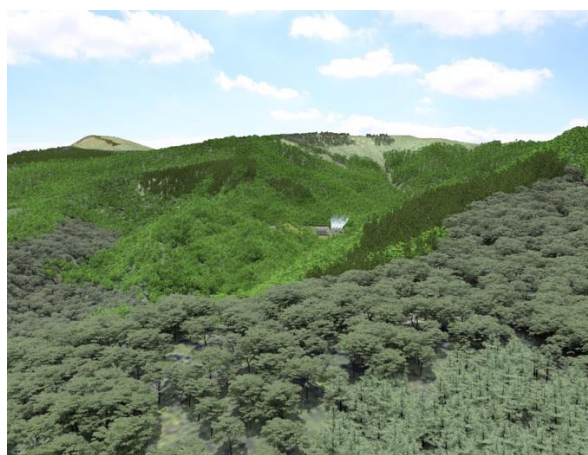


図-3 CG画像例（遠景）

## 4. 実験結果

評価実験の結果から固有値法を用いて被験者ごとに重みを算出した．しかし，複数の一対比較を行うとその回答は多少の矛盾を含むことも多く，大きな矛盾のある回答を含んだ結果の信頼性は低い．そこで，回答の信頼性を測る尺度として，整合度（以下，C.I.という）を参照した<sup>10)11)</sup>．C.I.は被験者の回答ごとに計算され，一対比較の結果が整合的であるほどC.I.は小さくなる．一般的にC.I.が0.1～0.15以下の場合であれば，その一対比較は整合的だと認めてよいとされている<sup>10)11)</sup>．本研究では，回答のうちC.I.が0.1以下のものを分析に用いてそれぞれの重みを計算した（表-3～7）．項目及び視距離の重みは景観上の重要性を相対的に比較できるように定量化したものである．一方，水準の重みは景観に与える影響の大きさを数値として定量化したものである．したがって，水準の重みは大きい方が景観への影響が大きく，小さい方が景観に与える影響が小さい．

表-3 項目の重み

項目	重み
造成規模	0.395
建屋高さ	0.128
冷却塔配置	0.476

表-4 造成規模に関する視距離別の水準の重み

造成規模 の水準	視距離		
	近景	中景	遠景
一般土木	0.353	0.331	0.403
法面縮小	0.408	0.381	0.330
尾根保全	0.239	0.288	0.267

表-5 建屋高さに関する視距離別の水準の重み

建屋高さ の水準	視距離		
	近景	中景	遠景
20m	0.518	0.522	0.481
16m	0.299	0.293	0.284
12m	0.183	0.185	0.235

表-6 冷却塔配置に関する視距離別の水準の重み

冷却塔配置 の水準	視距離		
	近景	中景	遠景
長辺配置	0.552	0.631	0.560
並列配置	0.275	0.258	0.307
短辺配置	0.173	0.111	0.134

表-7 項目別の視距離の重み

視距離	項目		
	造成規模	建屋高さ	冷却塔配置
近景	0.680	0.577	0.535
中景	0.171	0.259	0.263
遠景	0.149	0.164	0.202

## 5. 分析・考察

### (1) 評価項目間の重み

階層分析法による一対比較から評価項目の重みを算出した。項目については「冷却塔配置 (0.476)」「造成規模 (0.395)」「建屋高さ (0.128)」の順となり、「冷却塔配置」が最も重視されることが明らかになった(表-3)。CG画像上は造成規模の変化が最も大きく見えるが、冷却塔から出る白煙の周囲との対比が大きく強調されたものと考えられる。

### (2) 視距離の変化による重み

各項目が視距離によってどのように変化するかについては、「造成規模」、「建屋高さ」、「冷却塔配置」の全ての項目で近景の時の重みが最も大きく、視距離が遠

くなるにつれて重みは小さくなった(図-4)。特に「造成規模」は近景と中景の間での差が大きく、他の2項目と比べて視距離の変化による景観への影響の低減効果は大きいといえる。

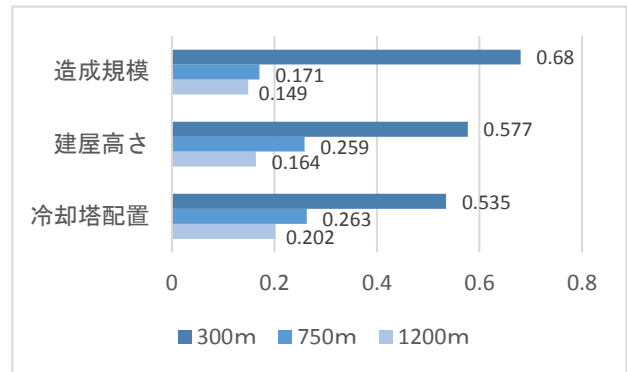


図-4 視距離の違いによる重みの変化

### (3) 水準の重み

評価項目ごとの水準による重みの数値から全ての視距離において「建屋高さ」は高さが低くなるにつれ、「冷却塔配置」は白煙の見えの大きさが小さくなるにつれて周辺との違和感が低減する結果となった(図-5, 6)。しかし、「造成規模」の近景と中景では地形改変の大きさ順ではなく、「一般土木」よりも造成面積の小さい「法面縮小」が最も違和感が大きいという結果になった(図-7)。被験者の自由記述の内容を見ると、「風景に違う色のあるものと目立つ」や「建物、外壁色と周囲の色が同化していると目立たなくなる印象を持つ」といった色彩に関する内容が見られた。つまり、地形改変の大きさよりもCG画像上に配置された施設の目立ちやすさが影響したと考えられる(図-8の赤丸部分)。実験上は施設配置も同じになることが望ましいが、実際の計画上は施設配置が造成方法によって影響を受けるためこのような結果となり、特に施設が目立ちやすい近景において造成以外の点が評価に影響を与えたものと判断される。

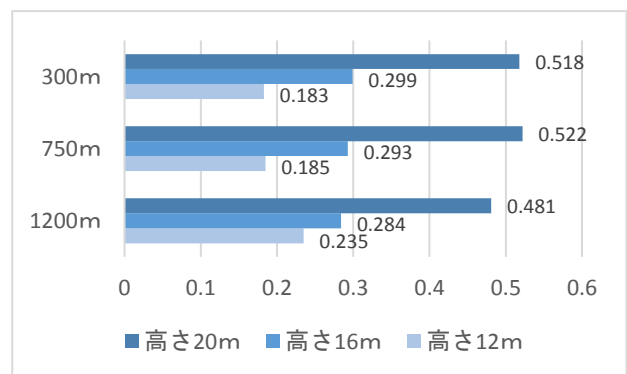


図-5 水準間の重みの変化 (建屋高さ)

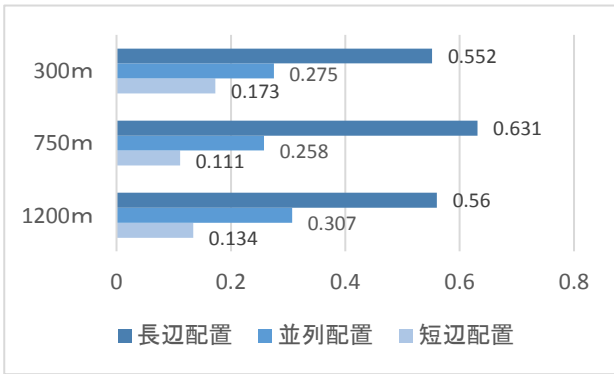


図-6 水準間の重みの変化 (冷却塔配置)

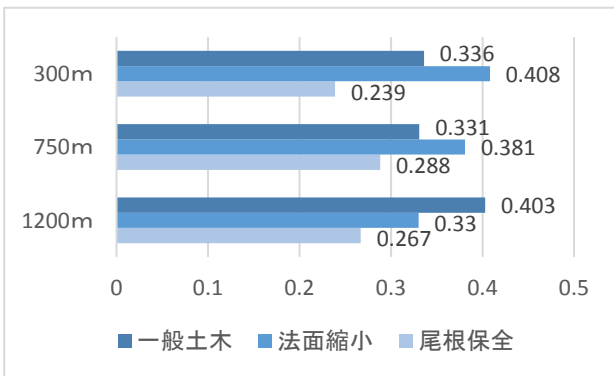


図-7 水準間の重みの変化 (造成規模)



図-8 造成規模の水準「法面縮小」で使用したCG画像

#### (4) 水準と視距離による影響の変動

実験結果をもとに、異なる項目、水準、視距離での景観への影響を相対的に比較するために項目、水準、視距離それぞれの重みの積を景観影響スコアとして計算する。景観影響スコアの求め方を式 (1) に示す。

$$S = I_W \times D_W \times L_W \quad (1)$$

ここで、 $S$ は景観影響スコア、 $I_W$ は評価項目の重み、 $D_W$ は視距離の重み、 $L_W$ は水準の重みを表している。

#### a) 造成規模の景観影響スコアの変化

造成規模について、造成規模の水準と視距離による景観影響スコアの変化をグラフに示す (図-9)。近景では水準による差はあるものの、いずれの水準でも景観影響スコアが大きく、視距離が遠くなるにつれて景観影響スコアの低減も大きい。一方、どの視距離でも「尾根保全」の重みが最小であることから、造成面積を小さくすることは景観への影響低減に効果的であることを示している。

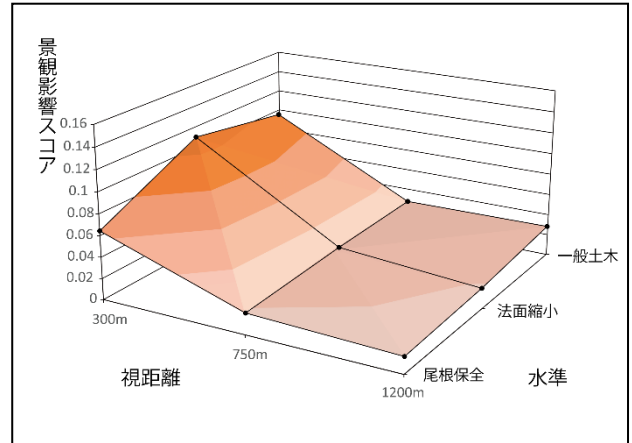


図-9 造成規模の景観影響スコアの変化

#### b) 建屋高さの景観影響スコアの変化

建屋高さについて、建屋高さの水準と視距離による景観影響スコアの変化をグラフに示す (図-10)。他の評価項目と比べて項目自体の重みが小さいため、全体的に景観影響スコアは小さい結果になった。近景に視点がある場合には建屋高さによる低減効果は相対的に大きい、そうでない場合には景観への影響の改善は相対的に小さいことを示している。

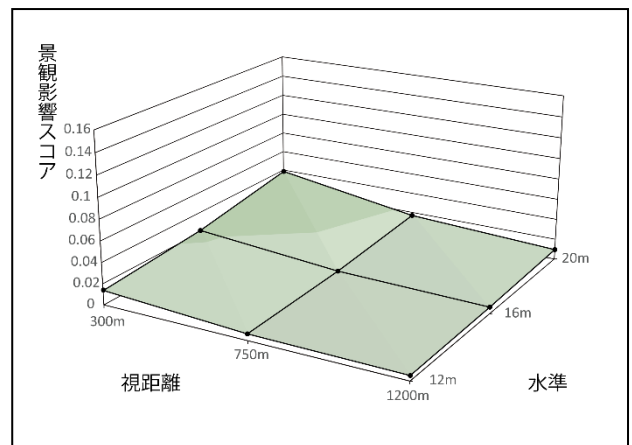


図-10 建屋高さの景観影響スコアの変化

### c) 冷却塔配置の景観影響スコアの変化

冷却塔配置について、冷却塔配置の水準と視距離による景観影響スコアの変化をグラフに示す(図-11)。近景時に冷却塔の長手方向が見える「長辺配置」の景観影響スコアが他の項目、水準も含めて最も大きく、距離が遠くになっても景観影響スコアはあまり下がらず、景観に対する影響は低減されにくいといえる。

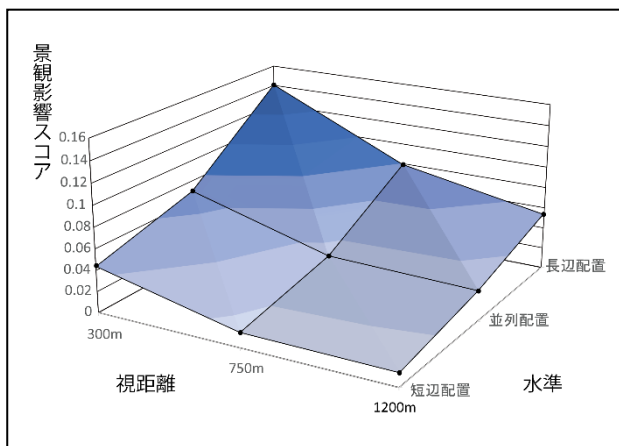


図-11 冷却塔の景観影響スコアの変化

## 6. まとめ

### (1) 結論

本研究では、一般被験者70名を対象に階層分析法を用いた一対比較アンケート実験により、各評価項目・水準の重みを求め、視距離を考慮した評価傾向を把握した。このことから得られた結果を以下に示す。

- 1) 地熱発電所施設が風致景観へ与える影響を「造成規模」, 「建屋高さ」, 「冷却塔配置」の3つの評価項目からなる評価構造として示し、計画時における地熱発電所周辺の景観評価手法の代表的な枠組みを設定した。
- 2) 一対比較アンケートから設計項目において、「冷却塔配置」, 「造成規模」, 「建屋高さ」の順に影響を与えることを定量的に明らかにした。また、視距離の変化による景観への影響の低減を定量的に示した。

### (2) 今後の課題

評価実験の際に水準の差以外の所を評価した被験者がみられたため、水準の差だけに注目されるようなCG画像表現を工夫する必要がある。

**謝辞:** 本研究は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の地熱発電技術研究開発「エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発」の一環として実施したものです。

### 参考文献

- 1) 環境省: 国立・国定公園内における地熱開発の取扱いについて, 平成24年3月27日環自国発第120327001号各地方環境事務局長 各都道府県知事宛 環境省自然環境局長通知
- 2) 環境省: 国立・国定公園内における地熱開発の取扱いについて, 平成27年10月2日環自国発第1510021号, 各地方環境事務局長 各都道府県知事宛 環境省自然環境局長通知
- 3) 小川総一郎: エコロジカル・ランドスケープというデザイン手法 —生物多様性に配慮した空間を総合的にデザインする50シート—, 理工図書, pp.20-37, 2009.5
- 4) 小柴茉優, 中井検裕: 我が国における地熱発電所の景観計画に関する研究, 東京工業大学卒業論文, 2015
- 5) 津波倉健太, 錦澤滋雄, 村山武彦: 国立・国定公園内の地熱発電施設に対する登山者の景観評価, 第14回環境アセスメント学会研究発表大会要旨集, 2015
- 6) David OSTMAN: A New Approach for Assessing Landscape Impacts of Geothermal Power Plants: A Case Study of Hellisheiði, Faculty of Life and Environmental Sciences University of Iceland, 2015
- 7) 環境省: 国立・国定公園内における地熱開発に係る通知見直しに向けた基本的考え方, 平成24年3月27日
- 8) 坂場論士, 嶋田拓水, 福井恒明: 地熱発電所の景観計画における視点場評価, 第11回景観・デザイン研究発表会, 2015 (ポスター発表)
- 9) 篠原修: 土木景観計画, 新体系土木工学59, 技報堂版, p.91, 1980
- 10) 木下栄蔵: 入門AHP 決断と合意形成のテクニック, 日技連, pp.29-31, 2011
- 11) 高萩栄一郎, 中島信之: Excelで学ぶAHP入門 問題解決のための階層分析法, オーム社, pp.29-30, 2005