

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測とモニタリングによる対策効果の検証

5-1 対策の効果予測とモニタリングによる対策効果検証の考え方

<本節での要点>

- ・ 対策効果が現れるのに時間を要するため、対策による改善効果の検証方法・評価方法においては、モニタリングによる効果確認だけでは不十分である。
- ・ そのため、数値シミュレーションにより対策効果を見える化することができる「地下水解析モデル」を活用することが効果的である。
- ・ 硝酸性窒素等による地下水汚染に係る関係者は多いことから、協議会等により対策状況の共有や進捗管理、また対策効果の検証を行うことが重要である。

(1) 対策効果の発現

河川等の地表水は一般に1日に1 km～数十 km 移動するのに対し、地下水は速くても1日に10 m～100 m 程度、中には1 m 未満のものもあり、地表水の流動に比べて非常に遅い。そのため、**対策の効果が発現（地下水質の改善）するには数年～数十年かかる**と考えられる。



【参考 地下水の流速】

地下水の流速はダルシー則によって求められる。

$$V = ki$$

($V(\text{cm/s})$: 流速、 $k(\text{cm/s})$: 透水係数、 i : 動水勾配)

ただし、水は間隙中を流れるため、流速を有効間隙率 (n_e) で割った実流速 (V_i) は

$$V_i = \frac{V}{n_e} = \frac{k}{n_e} i$$

となる。

例えば、砂層地盤において、水平距離 100 m で 1 m 低下する地下水の動水勾配は 0.01、透水係数を 1×10^{-2} cm/s、有効間隙率を 0.2 とすると、地下水の実流速は 5×10^{-4} cm/s となり、1日に流れる距離は、約 43.2 cm である。

(2) 地下水の見える化

対策による濃度低減には期間を要し、かつモニタリングだけでは十分に対策効果を確認できないことから、「地下水解析モデル」を活用し、地下水の流動や対策効果を見える化することが重要である。

(3) 関係者との連携

地下水解析には科学的に難しい点を含むことから、地下水解析を行う場合は、専門家や研究機関等へ協議会等の構成員やオブザーバーとしての参画を依頼し、地下水解析方法の助言を求め、対策の効果検証を定期的に行っていくことが重要である。

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と モニタリングによる対策効果の検証

5-2 解析モデルを用いた対策効果の予測

5-2-1 地下水解析モデル

<本項での要点>

- ・ 地下水の硝酸性窒素等に着眼した解析では、地下水解析モデル等が用いられる。
- ・ モデルの構築にあたっては、解析の目的に応じて、最適なモデルを選定する必要がある。さらに、流域単位で地形・地質、気象、地下水位・水質等の情報の取得が必要であり、そのために、「4章4-1-3 実態把握」で示した情報の取得が精度向上の鍵となる。
- ・ 地下水解析モデルを用いた解析では、十分な現況再現を行った上で、対策を行った際の効果検証を行うことが必要である。

(1) 地下水解析モデルでできること

一般的な地下水解析モデルでは、地下水位、地下水流動、水収支等を求めることができ、任意の範囲、任意の期間での解析が可能である。地下水汚染の解析では移流拡散解析が用いられ、汚染対象物質の濃度を求めることができる。

解析の条件を変化（対策効果をモデル化）させることにより、**原因の究明や将来予測（対策効果の把握）**を行うことができる。

(2) 地下水解析モデルの種類

地下水解析モデルは一次元、二次元、準三次元、三次元がある。近年ではコンピューター技術の発達により広域の三次元での解析が可能となっている。移流拡散を解析できるモデルとしては、Dtransu、MODFLOW、GETFLOWS等がある（表 5.1）。

例えば長野県豊丘村における地下水解析では、鉛直二次元断面に任意厚さをもたせた準三次元モデルが構築され、地下水流動解析は MODFLOW、地下水汚染解析は MT3D の解析コードが使用された。地下水解析により硝酸性窒素等濃度が環境基準を下回るのに要する時間が推定されている（図 5.1）。

表 5.1 地下水解析モデル

プログラム名	次元	解析対象
Dtransu	3次元	飽和・不飽和浸透流、物質輸送
MODFLOW	3次元	飽和浸透流、物質輸送（MT3Dとの組合せ）
GETFLOWS	3次元	飽和・不飽和浸透流、物質輸送

国土交通省、河川砂防技術基準（調査編）、平成 26 年 4 月。（https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/index.html）を参考に作成

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と
モニタリングによる対策効果の検証

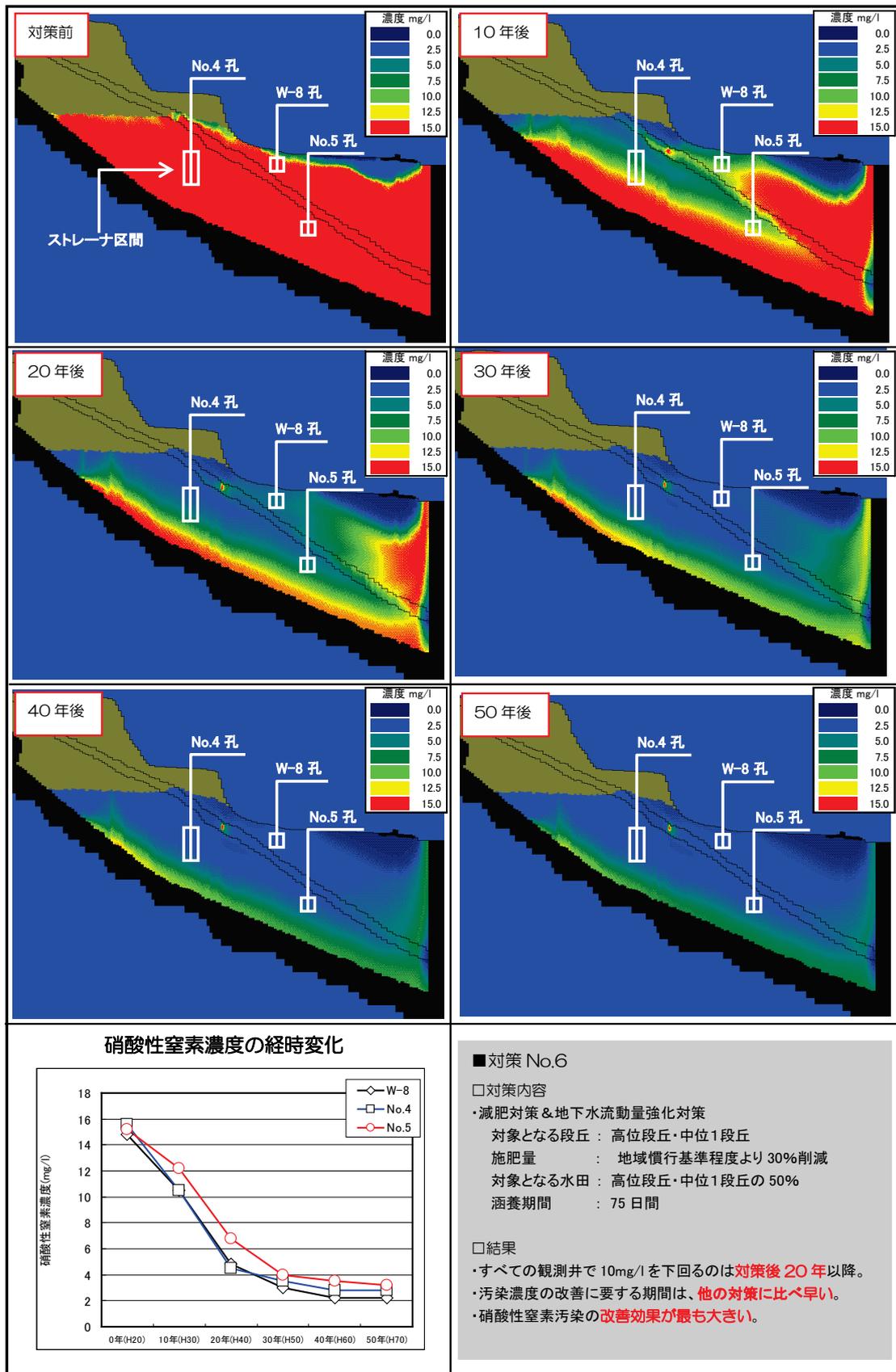


図 5.1 地下水解析結果

注：図中の硝酸性窒素は硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素のこと

出典：環境省、平成19年度 硝酸性窒素総合対策モデル事業 長野県豊丘村における硝酸性窒素対策検討調査報告書、平成20年3月。

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と
モニタリングによる対策効果の検証



【参考 地下水解析モデルの特性と適用】

表 5.2 地下水流動解析モデルの特性と適用

モデル	特性と適用条件
三次元モデル	<p>三次元方向の地下水の流動を計算するものである。多くの情報を必要とするが、透水層と難透水層の複雑な地層の形状や、透水係数等の水理定数が方向によって異なる異方性を反映できるなど、他のモデルに比べて地下水流動を正確に取り扱うことができる。</p> <p>飽和のみを扱うモデルだけでなく、地下水位に応じた被圧条件と不圧条件の変化、飽和—不飽和を解析するモデルなどがある。また、地下水の流動に加えて、溶解した物質や密度の異なる液体や空気、熱などの移動を組み合わせたモデルも開発されている。狭い範囲から広域にわたる様々な問題に適用できる。</p>
準三次元モデル① 半透水性の加圧層を考慮した多層構造を取り扱う方法	<p>複数の帯水層と半透水性の難透水層からなる地盤構成の地下水の流動を解析するとき用いられる。水平方向の地下水の流動を計算し、鉛直方向への流動量は、帯水層間の漏水量として、帯水層間の水頭差と帯水層間に挟在する難透水層の透水係数及び層厚より算出する。三次元モデルに比べて計算量が少なく、擬似的に三次元の地下水流動を取り扱うことができる。地下水位が大きく低下せず、帯水層が被圧状態での地盤沈下や、地下水揚水時の影響を検討する場合等に適用される。</p>
準三次元モデル② 地盤水理定数を地下水位の関数として多層構造を取り扱う方法	<p>複数の透水層の水理定数(透水量係数、貯留係数)を地下水位の関数として求め、解析を行う方法であり、準三次元モデル①に比べて多層構造の水理定数を考慮する点で優れている。広域の地下水流動を平面的に捉え、しかも地下水位の変動量が大きい場合、たとえば地下水位が低下し、被圧帯水層から不圧帯水層になったり、基盤まで地下水位が低下したりする場合に適している。</p>
準三次元モデル③ 鉛直スライス法	<p>三次元の領域を断面二次元で鉛直に分割し、それぞれ独立に飽和—不飽和断面二次元解析法により解析を行う方法である。断面間はダルシー則に従った二次元要素を用いて流量を求め、その流動を用いて断面二次元解析に反映させ、交互に計算を繰り返す。</p> <p>断面二次元モデルに比べて、三次元的に地下水流動を考慮する点で優れており、岩盤の割れ目が卓越している場合や断層破碎帯が存在する場合での地下水流動を取り扱う場合にこのモデルの特徴が生かされる。トンネル掘削や開削に伴う影響範囲や工法の検討等に適用される。</p>
断面二次元モデル	<p>断面方向の地下水の流動を二次元で計算するものである。岩盤の割れ目が少ない、あるいは、断層破碎帯が存在しないなど、断面を直行する方向に地下水は流動しないものと仮定できる場合に適用する。複雑な地質構造の中で、鉛直方向の地下水流動や地層の圧密収縮等を解析することに適している。トンネル掘削や開削に伴う影響範囲や工法の検討等に適用される。</p>
平面二次元モデル	<p>水平方向の地下水の流動が卓越し、鉛直方向の流動は微小である場合に用いられる。帯水層が1層の地域において、地下水揚水の影響範囲の検討を行う場合に適用される。</p>
一次元モデル	<p>1方向のみの地下水の流動を計算するものである。鉛直方向に物性が異なる粘土層内の水頭変化や圧密収縮(地盤沈下)、あるいは、実験室での流れの検討等に適用される。平面的な不均質性を検討する場合には、複数の地点に一次元モデルを適用する。</p>

出典：国土交通省．河川砂防技術基準（調査編）．平成 26 年 4 月．

(https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/index.html)

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と モニタリングによる対策効果の検証

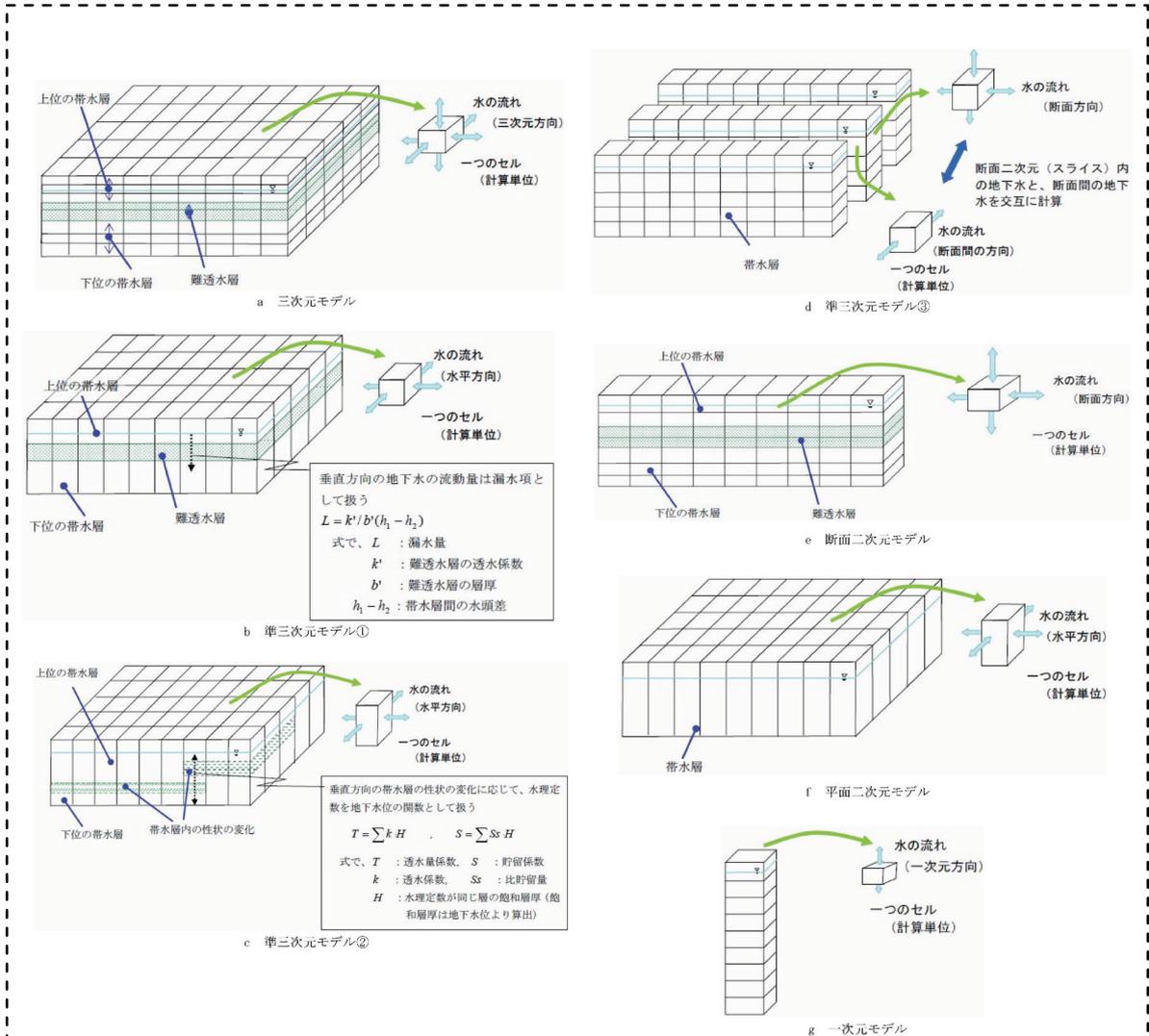


図 5.2 地下水流動解析モデルにおける空間分割のイメージ

出典：国土交通省、河川砂防技術基準（調査編）、平成 26 年 4 月。

(https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/chousa/index.html)

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と モニタリングによる対策効果の検証

(3) 目的に応じたモデルの選択の考え方

1) モデルを使用する目的

地下水解析モデルはモデルごとに長所・短所があるため、解析の目的や用途（地下水流動の把握か、地盤沈下や地下水揚水による影響検討か、トンネル掘削による影響範囲や工法の検討か等）に応じて、最適なモデルを選定する必要がある。

また、解析範囲を局所的か広域的どちらに設定するかや、解析を定常か非定常どちらで行うかの検討とともに、解析を非定常で実施する場合には解析期間をどう設定するか検討することも必要となる。

2) 収集可能な情報に応じた解析

モデル構築に必要なデータは、地形（標高）、地質（地質分布、透水係数等）、気象（降水量、気温等）、河川（取水量等）、地下水（地下水取水量等）、土地利用、供給源の情報等で多種多様である（p29 表 4.3 参照）。

このうち、地形や地質、気象、土地利用については、国土交通省の HP 等で公開されており、WEB 上からデータをダウンロードできる。一方で、河川や地下水、供給源の情報等については、各自治体や地域の関係機関が所有している場合が多い。これらのデータを入手することでモデルの再現性を向上させることが可能であるため、多くの関係者への問い合わせにより収集することが重要である。

解析に際しては、収集できた情報の量に応じて解析の精度に違いがあることを理解する必要がある。

(4) モデルの再現性検証に必要なモニタリングデータの取得

モデル構築後には現況再現計算を行い、得られた計算値と観測値とを比較することによって、現況をどの程度再現することができるか検証する必要がある。再現性の検証には十分な検証地点と長期的なモニタリングデータが必要である。



【参考 MODFLOW】

MODFLOW は USGS (米国地質調査所) が開発した有限差分法による 3 次元地下水
流動解析モデルである。以下に、岡山県の廃棄物処分場における解析事例を示す。

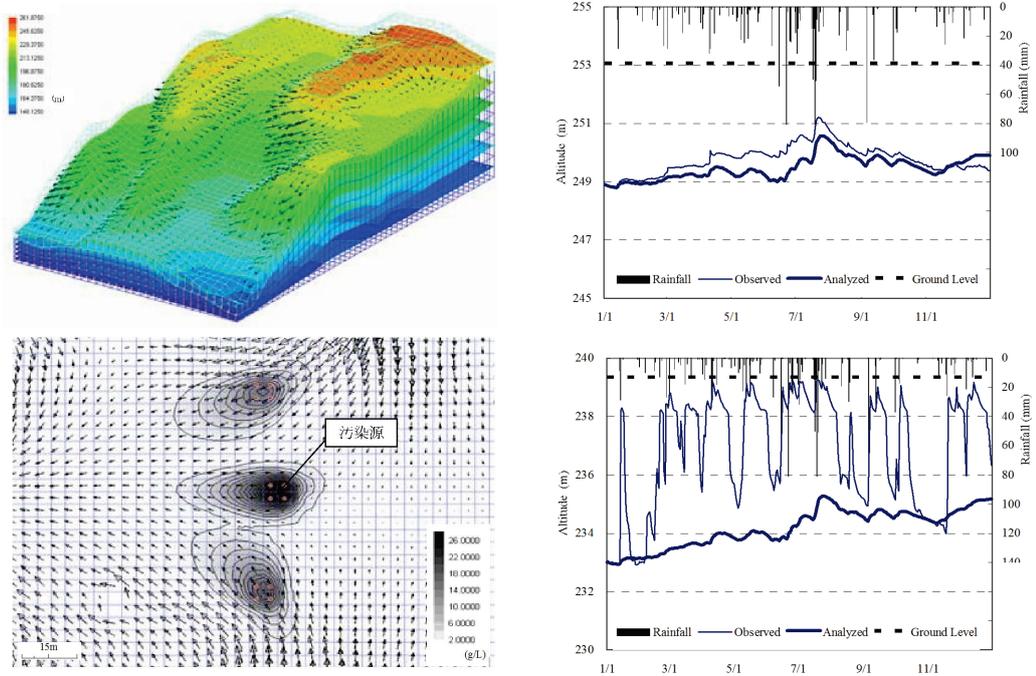


図 5.3 各地下水流動解析モデルの概念図

(左上：地下水位と流向ベクトル、左下：汚染物質輸送解析結果、
右：地下水位の観測値と計算値の比較)

出典：池本 賢弘，諸泉 利嗣，水藤 寛，小野 芳朗。廃棄物処分場における地下水流動及び汚染物質輸
送解析。農業農村工学会全国大会講演要旨集。2007，p572-573。（<http://soil.en.a.u-tokyo.ac.jp/jsidre/search/PDFs/07/07004-50.pdf>）

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と モニタリングによる対策効果の検証

5-3 モニタリングによる対策効果の把握

＜本節での要点＞

- ・ 対策の実施後は、供給源ごとの対策の実施状況、対策対象地域における公共用水域または地下水の水質の状況等を経年的に把握することにより、対策の進捗状況を確認する。
- ・ 対策の進捗状況の把握方法については、あらかじめ硝酸性窒素等による地下水汚染対策推進計画に盛り込み、的確に把握できるようにする。
- ・ 地下水解析モデル等を利用した場合は、対策の効果を可視化できるため、対策の進捗確認が容易になる可能性がある。

(1) 進捗状況の確認

対策の実施後は、供給源ごとの対策の実施状況、対策対象地域における公共用水域または地下水の水質の状況等を経年的に把握することにより、対策の進捗状況を確認する。

対策の進捗状況の把握方法については、あらかじめ硝酸性窒素等による地下水汚染対策推進計画に盛り込み、的確に把握できるようにする。

なお、地下水解析モデル等を利用した場合は、対策の効果を可視化できるため、対策の進捗確認が容易になる可能性がある。

例えば、熊本地域においては、現在第3期行動計画が策定されており、第2期行動計画の目標達成状況を確認している。また、都城盆地の硝酸性窒素削減対策実行計画は最終ステップにあり、硝酸性窒素濃度の平均値及び環境基準超過率等について経年変化のグラフを用い、地下水質の状況を把握し第2ステップの評価を行っている（図 5.4～図 5.8）。

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と モニタリングによる対策効果の検証

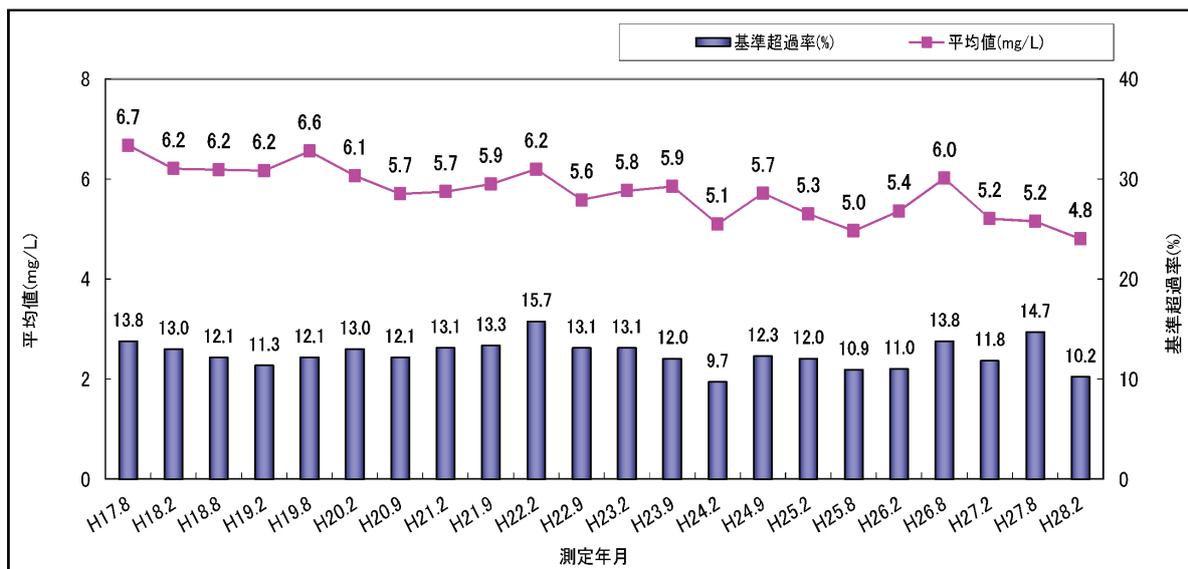
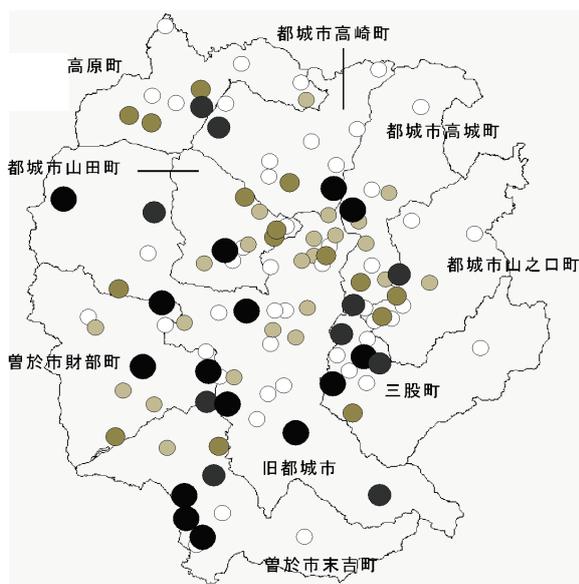


図 5.4 都城盆地内 110 本の井戸における硝酸性窒素濃度の平均値及び環境基準超過率の経年変化

出典：都城盆地硝酸性窒素削減対策協議会。都城盆地 硝酸性窒素削減対策実行計画－最終ステップ－。平成 28 年 7 月。 (https://eco.pref.miyazaki.lg.jp/data/miyakonojo_valley/)



※解析方法は、その推移が有意に増加又は減少しているかを判定するために、測定回数22回（平成17.8～平成28.2）における相関係数を求め、その相関係数を5段階に分けて評価を行った。

濃度傾向	井戸本数	計
● 増加している	15	25
● 増加傾向にある	10	
● 変動がみられない	15	70
● 減少傾向にある	22	
○ 減少している	48	

図 5.5 井戸ごとの硝酸性窒素濃度の推移

出典：都城盆地硝酸性窒素削減対策協議会。都城盆地 硝酸性窒素削減対策実行計画－最終ステップ－。平成 28 年 7 月。 (https://eco.pref.miyazaki.lg.jp/data/miyakonojo_valley/)

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と モニタリングによる対策効果の検証

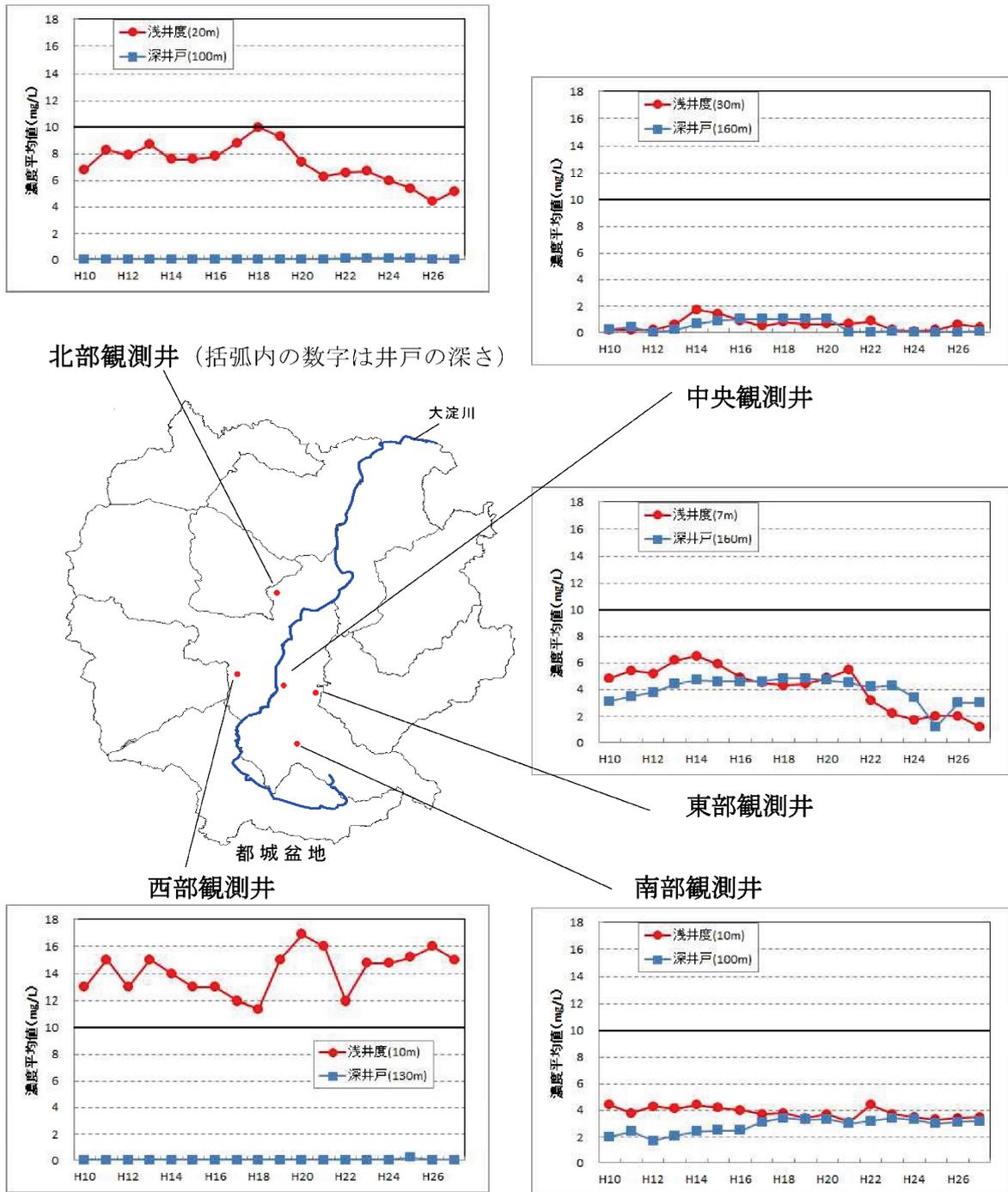


図 5.6 観測井位置及び硝酸性窒素濃度の年度平均値

出典：都城盆地硝酸性窒素削減対策協議会。都城盆地 硝酸性窒素削減対策実行計画－最終ステップ－。平成 28 年 7 月。 (https://eco.pref.miyazaki.lg.jp/data/miyakonojo_valley/)

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と
モニタリングによる対策効果の検証

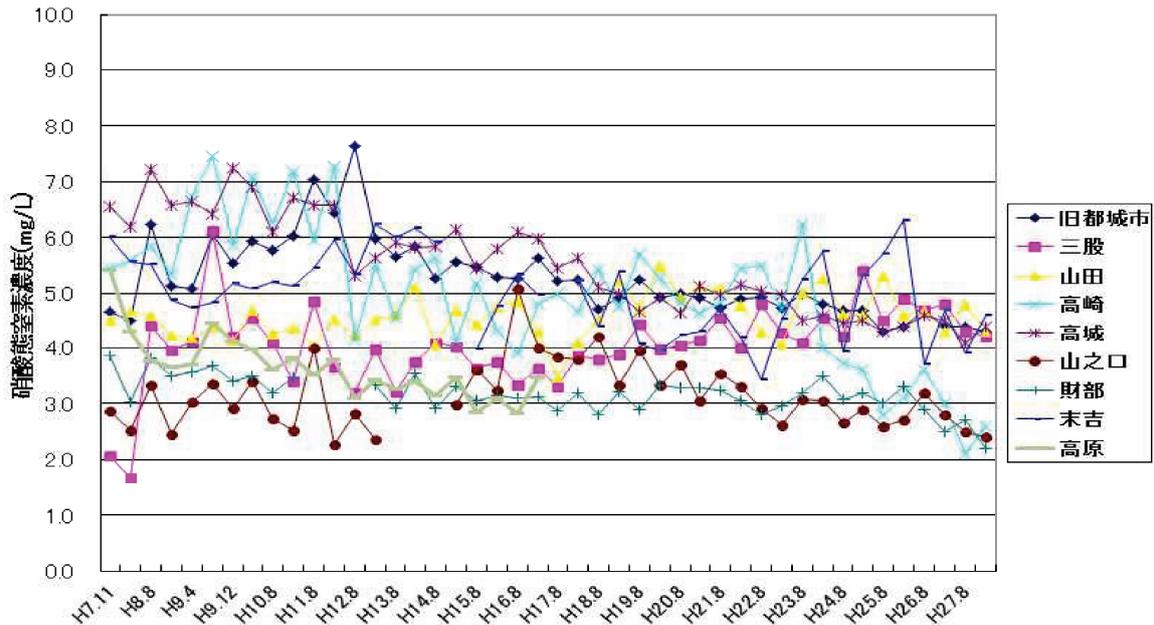


図 5.7 都城盆地における浅井戸の硝酸態窒素濃度の経年変化

出典：都城盆地硝酸性窒素削減対策協議会，都城盆地 硝酸性窒素削減対策実行計画－最終ステップ－，平成28年7月。（https://eco.pref.miyazaki.lg.jp/data/miyakonojo_valley/）

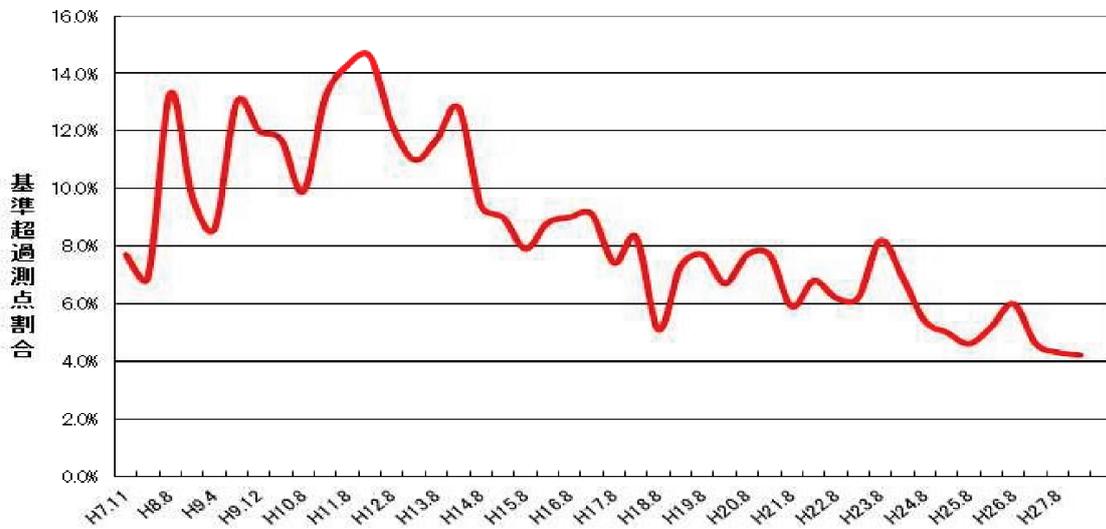


図 5.8 硝酸態窒素濃度の環境基準超過測点割合（環境基準超過測点／測点数）の経年変化

出典：都城盆地硝酸性窒素削減対策協議会，都城盆地 硝酸性窒素削減対策実行計画－最終ステップ－，平成28年7月。（https://eco.pref.miyazaki.lg.jp/data/miyakonojo_valley/）

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と モニタリングによる対策効果の検証

1) 負荷削減対策の実施状況の把握

硝酸性窒素等による地下水汚染対策推進計画に示された具体的な目標及び対策ごとに、対策施設の整備状況、窒素負荷量、窒素処理量等を調査する。調査が適切に実施されるよう、対策を行った事業者等において、対策の実施状況等の確認ができる一連の記録を作成・管理するよう指導する。

2) 水質の状況の把握

汚染範囲の把握調査、資料等調査、原因究明調査等の結果を踏まえ、供給源の立地・分布状況、地下水の流動状況、河川の流況等を勘案し、対策対象地域の公共用水域または地下水の水質の経年的な変化や対策の効果を把握できる地点を選定する。

調査項目は、硝酸性窒素等とし、必要に応じて、供給源の水質の特性を表す項目等を選定する。

(2) 対策効果の確認

効果的な対策を実施するためには、対策効果を検証できる状況とする必要がある。なお、検証にあたっては、データを継続的に取得し、そのデータを活用することが重要である。

また、協議会等による関係者の連携強化や問題意識の共有の下、対策計画の策定、進捗管理方法・体制の確立が重要である。なお、対策効果検証には、大学及び地方公共団体等の連携やデータ共有、協同研究・検討等が有効である。

5-4 対策効果の検証と評価

5-4-1 対策効果の検証方法

＜本項での要点＞

- ・ 地下水解析モデルで得られた解析結果は、対策を進めつつ、解析結果の妥当性を検証する必要がある。解析結果及び対策効果の検証は、地下水解析モデルでの解析結果と観測データを比較することで行う。
- ・ 対策効果の検証には、地下水位等高線（地下水位コンター）や硝酸性窒素等の濃度分布の把握が必要である。

(1) 地下水解析モデルによる解析結果の検証の必要性

地下水解析モデルで得られた解析結果は、対策を進めつつ、解析結果の妥当性を検証する必要がある。解析結果及び対策効果の検証は、地下水解析モデルでの解析結果と観測データを比較することで行う。

観測データと解析結果に違いが認められる場合には、その違いの要因検討、必要に応じて透水係数を変更する等の地下水解析モデル上での設定条件の見直しや再検討が必要となる。

(2) 対策効果の検証方法

効果対策の検証には、地下水流動の視点から観測井戸での地下水位の経時変化や地下水位等高線、また水質の広がり状況の視点から、複数の観測井戸での硝酸性窒素等濃度の経時変化の観測データが必要である。

モニタリングにより複数地点での地下水位や濃度を得られたら、同じ水位や濃度を曲線で結んだ地下水位等高線（地下水位コンター）や濃度コンターを作成し、地下水解析による現況再現の確認や効果検証に使用する。

5. 硝酸性窒素等による地下水汚染対策の効果予測と モニタリングによる対策効果の検証

5-4-2 地下水解析と対策効果の評価

＜本項での要点＞

- ・ 一定程度の情報が収集できれば、地下水の流動及び汚染の状況を再現でき、対策効果の評価を行うことができる。

(1) 対策効果の評価

一定程度の情報が収集できれば、地下水の流動及び汚染の状況を再現でき、対策効果の評価を行うことができる。

(2) 地下水解析を用いる上での留意点

本来、地下水解析を用いた対策効果の検証・評価は、地下水解析に必要な十分な情報を収集し、現況再現を行った上で実施する必要がある。

ただし、十分な情報が収集できてない状況において地下水解析モデルを用いた効果検証を行った場合は、その検証結果の不正確性を踏まえ、施策の方向性を決めるための利用や対策効果結果を踏まえた関係者への理解促進に利用する程度に留めることに留意する。

なお、十分な評価を行うためには、4章4-1-3で示した対策対象地域の基礎的な情報について時間をかけて収集する必要がある。

5-4-3 地下水解析の可視化、住民等への説明資料作成

＜本項での要点＞

- ・ 地下水解析モデルにより得られた解析結果を用いて地下水の挙動や対策効果を可視化することで、関係者への説明や関係者との合意形成を図ることが重要である。
- ・ 特に、対策実施の有無による汚染状況の差を示すことで、効果の発現に長期間を要する硝酸性窒素等による地下水汚染対策に理解を得て、継続的な対策を実施することができるようになる。

(1) 地下水解析による可視化の目的

地下水解析モデルにより精緻に地下水解析を行ったとしても、その結果は数値の羅列でしかないため、住民等の理解を深めるためには、よりわかりやすい解析結果を示すことが重要である。また、対策を行った場合の効果を明示することも重要である。

地下水解析モデルにより得られた解析結果を用いて、**地下水の挙動や対策効果による濃度の面的な広がりや時間変化を見える化することで**、対策効果を視覚的に把握することにより、**関係者との合意形成や対策への意識向上**を図ることができる。特に、対策の実施有無による汚染状況の差を示すことで、効果の発現に長期間を要する硝酸性窒素等による地下水汚染対策に理解を得て継続的な対策を実施できるようになる。対策実施による地下水質濃度の比較の例は図 5.9 に示すとおりである。

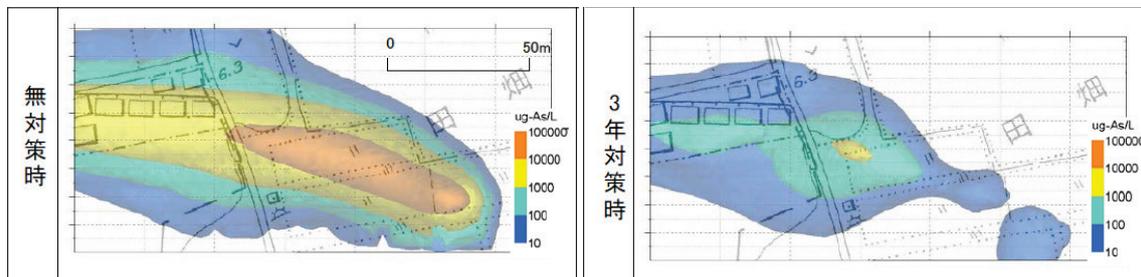


図 5.9 対策実施による地下水質濃度の比較の例

出典：環境省、茨城県神栖市における汚染メカニズム解明のための調査 高濃度汚染対策等報告書、平成 25 年 11 月。（<http://www.env.go.jp/chemi/report/h25-04/>）

(2) 対策による効果の説明資料作成の考え方

説明資料の作成では、対策効果を汚染物質濃度の分布や経時変化で示すと効果的である。特に、**対策を行わなかった場合の汚染拡散の可能性**を示すとともに、**対策効果が現れるのに長時間を要すること**を示す必要がある。