

# GISを用いた地下空間に起因する地表陥没発生危険性とその評価手法に関する研究

## Risk assessment and evaluation method of cave-in occurrence triggered by underground space by using GIS

江崎哲郎\*・渡部康祐\*\*・鹿田光一\*\*\*・藤原盛光\*\*\*\*

Tetsurou ESAKI, Kosuke WATABE, Kohichi SHIKATA, Morimitsu FUJIWARA,

It is well documented that cave-in phenomena often cause problems in quarry sites. To solve this problem, it is necessary to construct a system that can appropriately estimate and grasp the position and scales of cave-in generation. In this study, by using GIS, layers of the influential factors are produced, integrated, analyzed, the risk assessment is carried out and evaluation method of cave-in occurrence has been proposed. The safety factor distribution of the pillar collapse is obtained considering excavation rate and overburden. Based on the safety factor, possibility of cave-in occurrence is quantitatively clarified. It is found that the proposed evaluation method by using GIS can effectively examine the cave-in occurrence risk.

Keyword: cave-in, GIS, safety factor, excavation rate

### 1. はじめに

浅い地下空間はアクセスが容易で、経済的にも有利なので古くから開発が進められてきた。一般に多くの地下空間の安定問題は、無限媒体と仮定して検討される。しかしながら、浅い地下空間は地表面を境界とする半無限体として取り扱うことになる。この場合、被りの大きさ、地盤の特性が地下空間の安定に大きく影響し、不安定となるとその影響が地表にまで及び易く、陥没が生じることが多い。

この陥没現象は、不連続な落差を生じ、地表でも大きな被害を生じることになるが、この予測、対策方法については不明のことが多いのが現状である。代表的なものとして、炭坑跡や採石場跡などの浅い地下空間では、空間を支持する残柱や天盤が崩壊し、地表陥没現象を生じることがしばしばある。この地表陥没現象は、一般の地表沈下のように、地下の掘削や圧密などによって地盤が移動して、ある角度で規定される範囲の地表部分が徐々に沈下し、やがて収束するような現象とは異なり、予兆がほとんど見られずに瞬時に発生する。これは掘削直後に発生することもあるが、空洞形成後、長期間経過した後に突然発生することが多い。そしてその結果として、落差の大きい陥没孔が生じるため、重大な事故になりかねない。この現象は、発生するとその被害が直接地表に及ぶこと、さらには予兆が少なく突発的であるためその発生予測が難しいこと等から、多くの危険性を有している。この問題に対して、陥没発生の可能性のある場所に重要な構造物

---

keyword 地表陥没 陥没発生危険度 GIS

|      |      |    |                               |
|------|------|----|-------------------------------|
| *    | 正会員  | 工博 | 九州大学大学院工学研究科教授 環境システム科学研究センター |
| **   | 学生会員 |    | 九州大学大学院工学研究科建設システム工学専攻        |
| ***  | 正会員  | 工博 | 九州東海大学工学部助教授                  |
| **** |      |    | 川崎地質(株)                       |

を建設する際などには、その要因である地下空洞を埋め戻すなどの、直接的な対処が行われている。しかし広い範囲に分布するすべての地下空洞に対してこのような対処を行うことは、経済的にも明らかに不可能である。このような問題を解決するためには、地表陥没の発生する位置や規模を予測し、陥没防止のための対策が必要な領域を適切に把握できるようなシステムを作ることが望まれる。

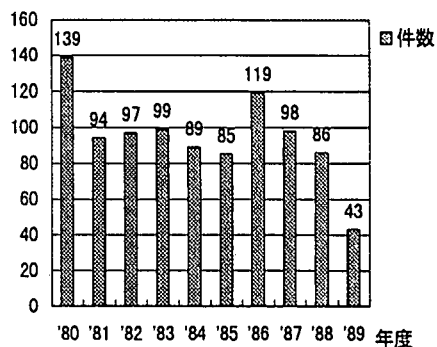
今日まで、地表陥没そのものの現象を知る目的で、その発生機構について多くの研究が行われ、理論的解明がなされている<sup>1)～5)</sup>。しかしながら、実際に直面する広域かつ複雑な浅い地下空間の存在する現場において、地表のどこに陥没が起こりやすいかという危険性を明確にかつ適切に判断し、予測する技術は全くといっていいほど進んでいないのが実状である

本研究では、まず、過去に発生した浅い地下空間に起因した地表陥没の事例と地表陥没の特徴について整理し、地表陥没の発生危険性を評価するために、GIS (Geographic Information System: 地理情報システム) を適用することの有効性について検討する。そして、GISを用いて、陥没の発生に影響を与える様々な要素を分析・統合し、広域に浅い地下空間が分布し、陥没が問題となっている地域に対して、発生危険性を評価する新しい手法を提案し、妥当性について検討した結果を示す。

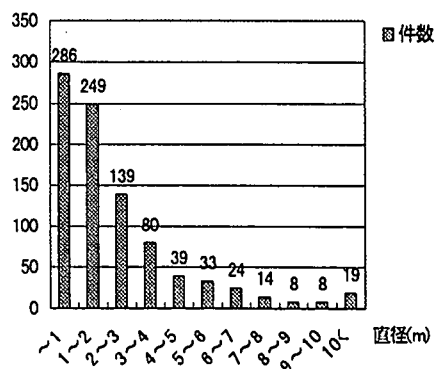
## 2. 地表陥没の事例とその特徴

地表陥没[sinkhole, cave-in]は、地表面下の浅い地下空洞が分布する地域において、残存空洞の天盤が破壊崩落し、これが繰り返されて地表面まで達し、地表面に陥没孔を生じることをいう。陥没による被害は探掘された空洞の直上であれば、家屋、道路、田畑、山林など、至る所で発生する可能性がある。発生が局所的であるために広域にわたって全般的に被害が生じることはほとんどないが、家屋が基礎の破壊により倒壊したり、道路などに突然陥没孔が生じるなど、時に人命に関わる死亡事故などの重大な災害となったり、我々の社会生活の中で長期にわたり影響を及ぼすことも考えられる<sup>6)</sup>。

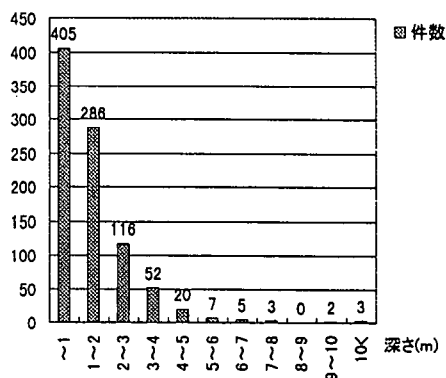
地表陥没は比較的浅い地下の空洞形成に起因することから、石炭などの資源採掘やドリーネの発達する石灰岩地域、土被りの薄いトンネルにおいてしばしば発生する。過去に発生した地表陥没の代表的事例を以下に示す。



図－1 地表陥没の年次別発生件数<sup>5)</sup>



図－2 地表陥没の直径(長径)別発生件数<sup>5)</sup>



図－3 地表陥没の陥没深さ別発生件数<sup>5)</sup>

北部九州の産炭地域においては、多い時で年間 200 件を超える地表陥没が発生した。1980 年から 1989 年までの 12 年間に観測されたこの地域における年次別の地表陥没発生件数を図-1 に示す。この地域は今世紀初めから石炭の採掘が行われ、1960 年代にそのほとんどの炭坑が閉山している。それから少なくとも 40 年経た現在も、残存している地下空間が突然に崩壊し地表陥没が発生している。1980 年をピークに多少の増加はあるが緩やかな減少傾向にあるため、いずれはこれらの陥没も収束に向かうと考えられる。陥没孔の孔径別の統計を図-2 に、陥没深さと発生件数の関係を図-3 に、陥没件数と空洞深度の関係を図-4 に、1980~1989 年の間に発生した陥没の月別件数と降雨量の関係を図-5 に示す。これらの図から、陥没孔の直径（長径）は 3m 以下のものが全体の約 75% を占め（図-2）、陥没深さは調査件数の約 90% が 3m 以下であることがわかる（図-3）。空洞深度は 10~15m においてピークを示し、発生件数の約 75% が 20m 以下の浅い地下空間において発生していることがわかる。また、深度が 15m までは、空洞深度の増加に伴い発生件数は増加するが、それ以上になると徐々に減少する傾向が見られる（図-4）。さらに地表陥没の発生は 6、7 月の雨期に多く、降雨による土被りの単位体積重量の増加、地下水位の上昇に伴う間隙水圧によるせん断強度の減少、そして水の飽和による地盤の強度低下の影響を示唆する（図-5）いくつかの建設工事で、浅い地下の古洞水が急激に揚水されたために、地下水が満たされて安定を保っていた古洞が崩壊し、陥没が発生したことがある<sup>7)</sup>。また 1978 年 6 月に発生したマグニチュード 7.4 の「宮城県沖地震」によって、その付近の亜炭採掘地域における地表陥没が頻発した。1977 年までは発生件数は 15~20 件/年程度であったが、1978 年にそれまでの 10 倍の 219 件の地表陥没が発生した（翌年には発生件数は激減している）<sup>7)</sup>。このように、地下空間に起因する地表陥没は、降雨や地下水の汲み上げなどによる地下水位の変化、地震などの外的刺激によって助長されることが分かる。最近でも栃木県の大谷石採取場地区、岡山のカルスト台地や各地の産炭地域などで陥没が発生している。陥没の発生要因は様々であるが、いずれも浅い地下空間の存在に起因している。しかし抜本的な解決策がないのが現状である。

以上の事例からもわかるように地表陥没は、地下空間の深度、採掘状況、地質、降雨、地下水位、地震など、多くの要素が複雑に絡み合って発生している。従って、この地表陥没問題を解決するためには、多くの異なる影響要素を考慮しながら効果的に処理し、検討を行う必要がある。

### 3. GIS（地理情報システム）の適用性

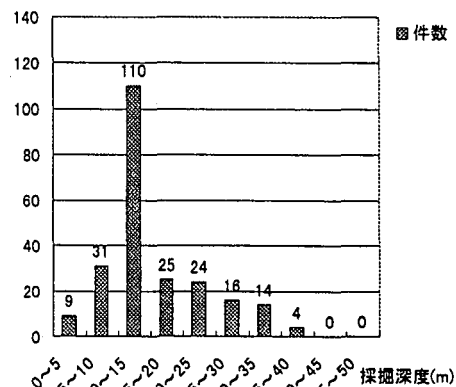


図-4 地表陥没の空洞深度別発生件数<sup>5)※</sup>

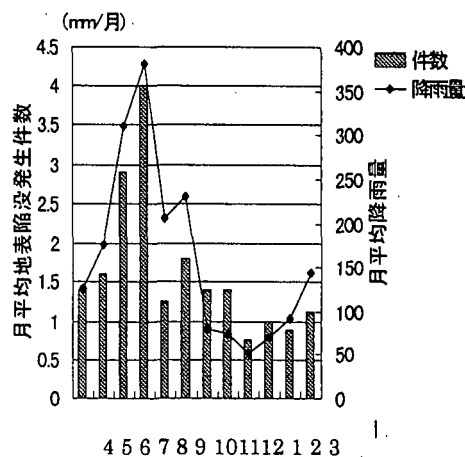


図-5 地表陥没の降雨量別発生件数<sup>5)※</sup>

地表陥没発生の評価に対して、従来の研究では特定の垂直断面を考えて、有限要素法などの応力変形解析を行っていた<sup>9)</sup>。しかしながらこのような手法は、地下空間が規則的で連続的に分布している場合の予測、評価には有効ではあるが、複雑な配置や構造を有する地下空洞では代表的任意断面を設定することは困難であり、必ずしも有効な方法とはいえない。このような問題は、3次元解析による評価を行うことで解決されるが、多大な労力を要することとなる。また、前節の事例からもわかるように地表陥没は、いろいろな影響要素が複雑に絡み合っている現象であるために単なる力学モデルではその現象、挙動を適切に評価することができない。さらに、必要なのは、安定解析の結果ではなく、それらを根拠とした広範囲の対象区域に存在する危険箇所の提示とその危険性の評価である。そのため、この評価には、数多くの多種多様なデータや解析結果を集約し、かつ空間的にこれらの相関性について捉え、その発生危険性を適切に表現できるような方法が必要となる。また、地表陥没による地表物件等への被害や影響の度合についても評価することが求められる。そこで GIS を用いた評価を取りあげる。GIS は、「空間的情報を持つ属性データを合理的かつ迅速に処理することが可能なコンピュータシステム」<sup>9)</sup>と定義される。位置や空間的關係を表す空間データ（例えば地図、地下空間の配置図、道路網図など）から、それに付随した数値や文字で表される属性データ（例えば地形の標高、土地利用、建物の住所など）を、総合的に解析、統合することができるツールで、データの取得、管理、検索、空間解析、情報提供（可視化）の機能がある。従って、広範囲にわたる評価および多くの影響要素を考慮する必要のある陥没問題に対しては、GIS は非常に有効であると考えられる。

#### 4. GIS を用いた地表陥没発生危険性の評価方法

##### 4.1 検討方針

地表陥没の影響を総合的に評価するためには、地表陥没の発生に着目した評価方法、及び地表陥没により生ずる被害や影響に着目した評価方法の両面からとらえていくことが求められるが、本研究ではまず前者の評価方法、いわゆる地表陥没発生の危険性について検討を行う。

浅い地下で採掘の行われた地域での地表陥没は前述したように、その採掘された地下空間を支持する天盤や残柱、側壁（以下、支持部）の崩壊に起因する。そしてこの崩壊が地表面に達するとき、地表陥没となる。支持部の崩壊は、様々な二次的要因が絡み合っていると考えられるが、主に支持部に直接負荷としてかかる直上の土被り荷重と各支持部が分担しなければならない土被り荷重（空洞上部の土被り荷重）に依存しており、いわゆる周囲の空間の採掘の割合、すなわち地下空間の配置状況に大きな影響を受ける。そこで、本研究では、土被り荷重と採掘の割合に着目し、広域に分布する地下空間の陥没に対する危険性の評価を行い、これに GIS（ソフトウェア：ArcView）を用いたモデルを構築して検討する。

##### 4.2 対象区域

残柱式採掘が行われ、浅い岩盤内に地下空間が残存するある地域について検討を行う。この地域は、古くから地下の採掘が行われており、現在ではそのほとんどが廃坑となっている。地下空間は、採掘の対象となる岩の地層に沿って存在し、極めて複雑な三次元的な分布を示す。

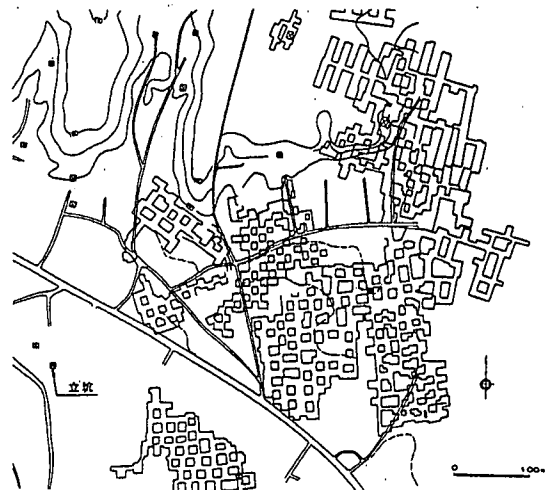


図-6<sup>11)</sup> 対象区域

表-1 対象領域の採掘空間統計と残柱の統計

| 採掘面積<br>(①)<br>m <sup>2</sup> | 残柱総面積<br>(②)<br>m <sup>2</sup> | 残柱本数<br>(③)<br>本 | 平均<br>残柱面積<br>m <sup>2</sup> | 平均<br>残柱幅※<br>m | 平均<br>空洞高さ<br>m | 空洞高さ<br>最大・最小 | 空洞高<br>さ分散 | 平均<br>空洞深さ<br>m | 支持部<br>総周長<br>km |
|-------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|------------|-----------------|------------------|
| 104479.25                     | 36853.31                       | 254              | 145.09                       | 12.05           | 13.2            | 48.0・1.0      | 97.5       | 37.5            | 21.37            |

※残柱断面を正方形と仮定したときの一边の長さ

この地域では、過去に数多くの地表陥没が発生している。この地域の中から、比較的空洞に関するデータを得られ、地形図、空洞の平面図が存在している区域（600m×700m）を、対象区域として選択する。地下空間の分布状況を図-6に示す<sup>11)</sup>。

この区域の特徴として、地下空間の形状は、概ね残柱と側壁で支持される空間の部分（空洞幅）が比較的一定となるように採掘されているが、著しく広い箇所もある。また、残柱の配列も概ね規則的に配置されているが、そうでない箇所もある。地下空間の高さは高いところで30m以上、低いところでは2mを下回っており、採掘跡は非常に複雑な分布状況を示している。また、その分布は採掘される岩の地層が傾斜していることから、地下空間は東側ほどやや深く、傾斜した分布状況を示す。そして採掘は立坑の直下から採掘されている箇所が多い。

さらにこの地域の特徴についてGISの基本的な機能を用いて定量的に整理する。入力に用いる図面は、解析の程度を考慮し、縮尺1/2500の地形図と、地下空間の平面図<sup>10),11)</sup>を用いた。これらを、スキャナを用いてイメージデータとしてGISに取り込み、等高線、水準点から標高の属性を与え、地盤標高のレイヤを、参考文献11)を基に天盤標高のレイヤを作成する。さらに地下空間の形状を表すレイヤを作成する。その際、これらのデータを総括して同時に分析を行うために、入力するデータにはすべて同じ座標系を与える必要がある。そこで建設省が定める（昭和43年建設省告示第3059号の規定による）公共座標系を基準座標系として与える。得られたレイヤに対してGISの検索・空間解析機能を適用し、対象区域の地下空間の特徴を整理した（表-1）。これらの結果をまとめると以下のようなことがわかる。

- ・対象区域内の採掘総面積をみると約100,000 m<sup>2</sup>と広範にわたって採掘されている。残柱の総断面面積との比をとると、約3:1であり、残柱が採掘空洞に対して25%は残るように採掘されている（側壁は除く）。
- ・平均空洞高さは13.2mであり、地下に広がりのある空洞が分布していることがわかる。
- ・残柱の形状は矩形と仮定すると、残柱幅は概ね8m～15mの幅であり、残柱の平均幅をとると約12mとなる。

なお、対象区域には採掘基準が与えられており、等配列で残柱を配置する場合、残柱の幅は約10m以上、空洞幅は約12m以内と定められていることから、平均的にみるとほぼ採掘基準にあった採掘が行われているといえる。

#### 4・3 地表陥没発生危険度の評価基準

残柱式採掘による地下空間では、残柱破壊による崩落、天盤の破壊による崩落、そして立坑の崩壊の3種類の異なる形態の空洞の破壊が発生していると考えられる。このうち、天盤の崩落については、天盤のスパンが比較的大きい所、または残柱の崩壊により天盤のスパンが拡大した所で生じると考えられるため、この崩壊についても残柱の崩壊による影響が大きいと考えられる。しかしながら、地下空間の崩落箇所が必ずしも陥没につながっているという訳ではなく、図-4に示すように比較的浅い地下空間においては、深度が大きくなるにつれて陥没の発生頻度は高くなるものの、逆に深度が大きくなりすぎると発生頻度は低くなる特徴を有する。このような特徴を考慮して、陥没は比較的浅い地下空間であることを前提とし、陥没は、残柱の破壊、すなわち空洞支持部（残柱と側壁部）に作用する荷重がその強度を超えた場合に発生すると仮定する。また、支持部の強度としては、入手可能なデータが少ないこと、さらには安全側の評価を行うという観

点から、一軸圧縮強度を用いる。さらに、支持部に作用する地山の荷重を適切に評価するために、採掘率( $X$ )を導入する。この採掘率は、ある基準領域に占める空間の割合と定義され、次式により表される。

$$X = \left( \frac{A}{A+B} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$A$ : 空間の面積     $B$ : 支持部の面積

規則正しい配置の広範囲の残柱式採掘の場合、残柱の寸法と空間の寸法から採掘率は容易に算出される。しかしながら、複雑な形状の残柱式採掘では採掘端部の側壁の効果も含めて各部分の採掘率を求めることが極めて困難である。ここで問題となるのは支持部のうち、側壁部が分担する支持領域の設定である。地下空間形成によって空間が増加することにより支持部が負担すべき荷重は増加する。このうち、側壁部による支持は、空間に近い部分で負担が大きくなり、ある距離以上離れると増加しなくなるが、側壁部の荷重分担状況は単純に把握できない。そこで、側壁には平均的な残柱が連続して存在すると仮定し、この部分が荷重を分担するものとする。また、側壁部が支持する範囲の幅は、対象区域に存在する残柱の平均幅と仮定する。このように側壁部にある幅を持たせて、これを解析領域とする。採掘率が大きいほど残柱および側壁、すなわち支持部が負担する地山の荷重は増加する。この採掘率の概念を導入し、残柱の圧縮破壊に対する安全率( $F$ )を次式により評価する。

$$F = \frac{\sigma_c}{\gamma H \left( \frac{100}{100-X} \right)} \dots\dots\dots (2)$$

$F$ : 残柱の圧縮破壊に対する安全率

$\gamma$ : 天盤の単位体積重量( $\text{kN/m}^3$ )

$X$ : 採掘率 (%)

$\sigma_c$ : 一軸圧縮強度(MPa)

$H$ : 土被り厚 (m)

(2)式は、一軸圧縮強度にもよるが、概して土被り厚が大きくなるほど安全率が低下する。このことは深度が比較的浅い空間においては矛盾するものではない(図-4参照)。現時点で、この式の適用範囲について言及することはできないが、限られた情報を用いた評価としては有効であると考えられる。

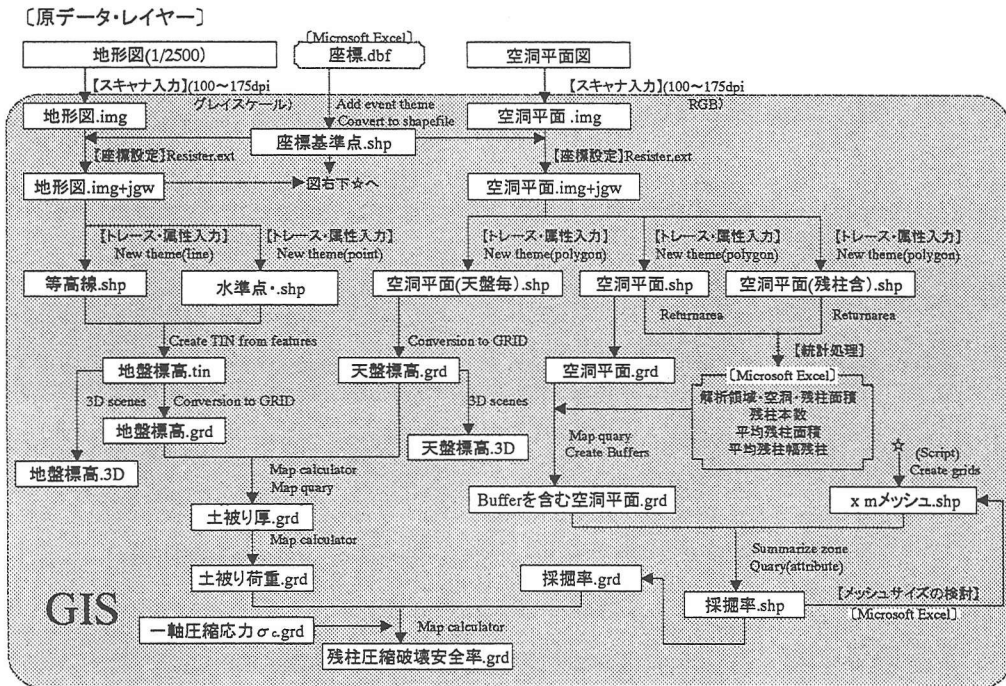
## 5. GISを用いた陥没発生危険性の評価

### 5・1 検討フロー

陥没発生危険性を評価する際の検討フローを図-7に示す。図に示すように、検討フローは非常に複雑となる。しかしながら、基本的な考えは、複数のレイヤの重ね合わせ・検索・解析により、土被り厚、採掘率のレイヤを導出し、最終的に安全率のレイヤを導出することである。以下にこれらのレイヤの作成手法を示す。

### 5・2 土被り厚のレイヤの作成

入手可能なデータとして地形図と地下空洞の平面図<sup>(11),(13)</sup>があり、これらを利用して土被り厚のレイヤを作成する。まず地形図の等高線、水準点、空洞平面図の天盤標高をイメージデータから読みとる。そのデータから地盤標高、天盤標高のレイヤを作成し、それらの差から土被り厚のレイヤを求める。まず、読みとった地盤及び天盤の標高値からGISの機能の一つであるTIN補間を行い各レイヤを作成する。さらに空間解析を行うためにラスタデータに変換する。このラスタデータをオーバーレイして土被り厚のレイヤを得る。得られた土被りのレイヤを図-8に示す。



図－7 GIS処理による残柱破壊の安全率導出のためのフローチャート

### 5・3 採掘率のレイヤの作成

採掘率は前述の通り、ある基準領域の面積に対する空洞の面積の割合で表される。これには、GISの空間解析機能の中から領域内の空洞の割合を計算する Summarize Zones 機能を用いることにした。本研究では基準領域として正方形のメッシュを考え、この大きさを設定するために以下の検討を行う。

基準領域の大きさ（メッシュサイズ）に際しては目的とする空洞の割合の分布状況すなわち採掘率をより正確に表現できるような大きさ、また、地

表での危険性の分布が実用に耐える精度で得られるような大きさに設定しなければならない。そこで、メッシュサイズによる採掘率の変化を確認するために、実際に5, 10, 12, 18, 20, 25mの各メッシュサイズ毎に採掘率の計算を行って比較・検討する。

#### (a) 解析領域全体の平均採掘率と各メッシュサイズの平均採掘率

解析領域のベクトルデータから領域全体の平均採掘率を算出する。またメッシュサイズ毎に求めた平均採掘率を算出する。これらの結果を表－2に示す。メッシュサイズが大きくなると採掘率は全体の平均採掘率よりも小さくなる傾向がある。これは、メッシュサイズ



図－8 土被り厚のレイヤ（左:Case-1,右:Case-2）

表－2 平均採掘率

| 対象地区全体   | 平均採掘率(%) |
|----------|----------|
| 10m mesh | 47.3     |
| 12m mesh | 45.9     |
| 15m mesh | 44.9     |
| 18m mesh | 43.3     |
| 20m mesh | 42.7     |
| 25m mesh | 41.3     |

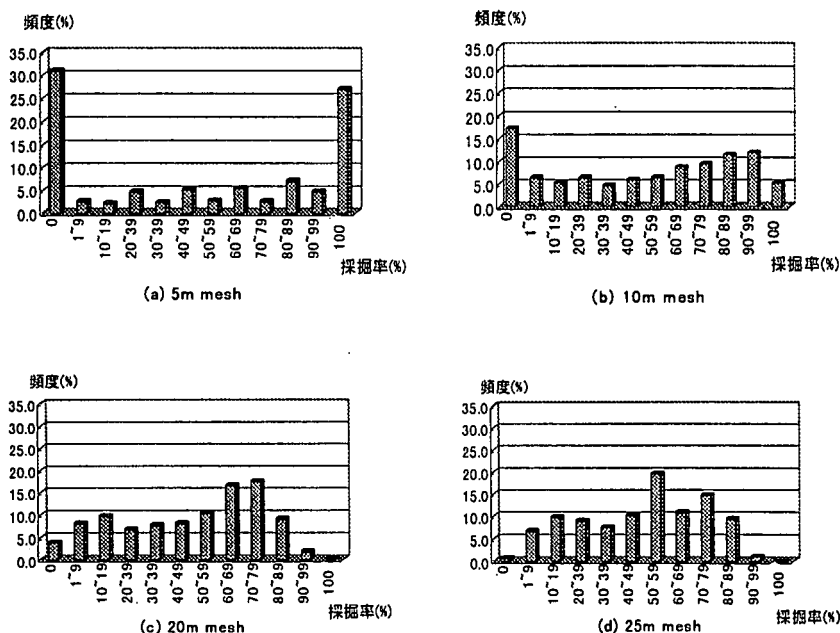


図-9 採掘率の頻度分布 (5,10,20,25m mesh).

を大きくすると、空洞の存在する解析領域よりも外側の空洞の存在しない部分を包含してしまうためである。また領域中央部では、発生する陥没の大きさと地表物件と比較して、漠然とした採掘率しか示されない。

#### (b) メッシュサイズ毎の採掘率の分布

メッシュサイズ毎の採掘率について、その頻度分布を図-9に示す。この結果から、5mのような小さいメッシュサイズでは、採掘率は0または100%に2値化され、領域における採掘率の分布を表現できない。

15~20mメッシュにおける全体的な傾向として、70~80%の頻度をピークとした分布が確認され、この程度のメッシュサイズが採掘率の分布状況をよく表現できると考えられる。

#### (c) 各メッシュを移動させた時の分布状況の変化

これまでは解析領域に対して、メッシュ位置を固定した解析を行った。しかしメッシュ位置が任意性を持つかどうかの検討が必要である。その位置の任意性を確認するためにメッシュの位置をメッシュサイズの1/2だけ移動させて分布状況の変化を比較した。その結果を図-10に示す。

この結果から、25mメッシュでは移動による分布の変化が現れた。このことから、メッシュ位置の任意性を示すことのできる最大のメッシュは20mであると考えられる。また、表-1で示した残柱の平均幅や、採掘基準による空洞の分布

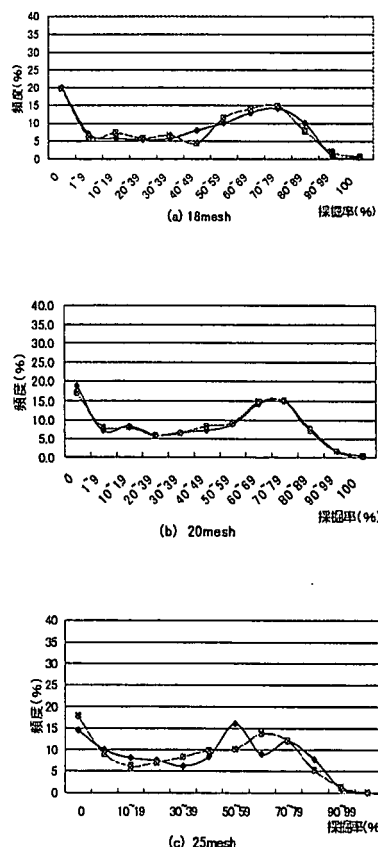


図-10 (右部) 解析メッシュをずらした際の採掘率の頻度分布の変化

状況等を考えても、今回の解析のためのメッシュサイズは 20m メッシュが最も適当であり、客観性もあることが明らかになった。

さらに、採掘率の分布状況の精度とメッシュ位置の任意性を高めるために、決定した 20m メッシュで求めた値を、10m に細分化したメッシュに格納する。また、メッシュ位置を x 方向のみ、y 方向のみ、x, y 両方向にそれぞれ 1/2 メッシュ移動し、得られた採掘率を細分化した 10m メッシュに格納する。そしてこれらを平均して算出した値を採掘率として 10m メッシュ毎に表現する。得られた採掘率のレイヤを図-11 に示す。

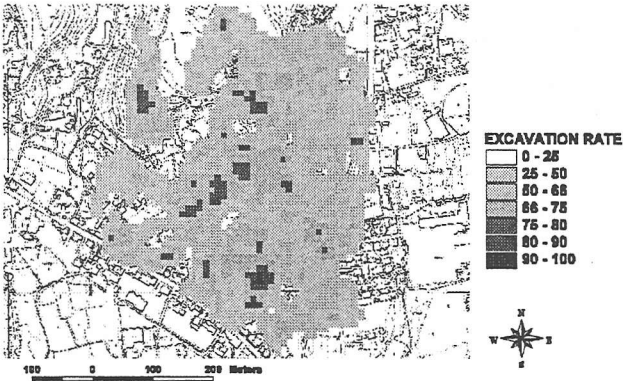


図-11 採掘率のレイヤ

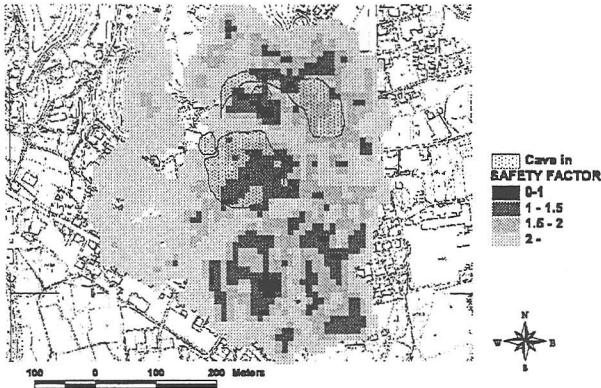


図-12 残柱圧縮破壊安全率のレイヤ

#### 5・4 残柱の圧縮破壊安全率のレイヤの作成

得られた土被り厚のレイヤ、採掘率のレイヤ、物性値を統合し、(2)式による解析を行い残柱の圧縮破壊安全率のレイヤを作成する(図-12)。また、図中には実際に発生した陥没の位置も示す<sup>13)</sup>。なお、単位体積重量、一軸圧縮強度の分布については、対象区域内で得られた物性値のデータが少なく、その分布状況もが得られなかったため、対象区域内で一様な値として平均値( $\gamma=20\text{kN/m}^3$ ,  $\sigma_c=5\text{MPa}$ )を用いる<sup>14)</sup>。

表-3 対象区域における安全率分布

| Safety Factor<br>(=F) | $F \leq 1$ | $1 \leq F \leq 1.5$ | $F > 2.0$ |
|-----------------------|------------|---------------------|-----------|
| (%)                   | 1.9        | 9.7                 | 75.7      |

#### 5・5 結果と考察

採掘率のレイヤ(図-11)より、平均採掘率は約 50%であり、75%以上の部分が局所的に見られ、採掘状況の分布にばらつきがあることが明らかになった。

圧縮破壊安全率のレイヤ(安全率の分布)(図-12)より、領域全体に対する安全率の分布の割合を表-3に示す。また、残柱の安全率が1を下回るのは解析領域全体に対して1.9%(約0.6ha)の領域であり、安全率が1.5以下の領域が9.7%、安全率が2以下の領域が24.3%であることから、安全率の低い領域は局所的に現れていることがわかる。実際に陥没が生じた箇所では、陥没原因が残柱の破壊でない陥没(立坑の崩壊による)を除いてはその安全率は1を下回っている。対象区域中央部の大陥没箇所の中心で安全率は $F=0.72$ を示し、ここでの陥没の要因が残柱の破壊によるものと推測される。但し、安全率が低いのに、陥没は発生していない箇所がみられるが、これは、地盤の強度特性が精度よく得られていないこと、地下水そ

の他の要因が考慮されていないこと、地下空間の深度が非常に大きいことなどがその原因として考えられる。これについては評価式の再検討も含めて今後の課題である。しかしながら、この方法を陥没問題のある全領域にわたって行えば、陥没発生危険性の高い位置を特定することができる見通しが得られた。また、このように空間的分布特性を有するデータに関しては、GISを用いることで効率的な処理が可能となることが明らかとなった。今後、様々な影響要素をGISを用いて処理することによって、より精度の高い陥没発生危険性の予測、ハザードマップの作成を行える可能性を示すことができた。

## 6. 結論

GISを用いた浅い地下空間に起因する地表陥没発生危険性の評価方法として残柱の圧縮破壊に着目し、その安全率を陥没発生危険性として評価することを提案し、実際の陥没問題に適用した。その結果、採掘率、土被り厚などから地表陥没発生に大きな影響を及ぼす残柱の破壊安全率のレイヤが得られ、その危険性を定量的に示すことができた。そして解析結果と実際の陥没発生の履歴との対比からその評価方法の有効性が検証された。また、GISを用いることでこの地域全体についても危険性評価の検討が効果的に行える見通しが得られ、今後多くの複雑な影響要素をも考慮した検討が行えると考えられる。

本論では地表陥没の発生危険性の評価についてGISの適用性を検証しながら述べてきたが、今後はより精密な発生危険性の評価のために、様々な要素（破壊のパターン、物性値、地下水の変化等）を考慮した検討を行っていく。また、地表陥没の影響を総合的に評価するために、今後は陥没により生ずる被害や影響に着目した陥没被影響度の評価を行っていく予定である。また、このように地表陥没が、資源採掘跡の地下空間に多いことを考えると、その利用の上では、供用期間のみならず供用期間以降、いわゆる廃棄後の空間についても有効利用が可能か否かを考慮しながら、明確かつ適切な計画を立てる必要があると考える。

## 参考文献

- 1) 西田正, 亀田伸裕: 浅所陥没の発生機構に関する研究(第1報), 日本鉱業会誌, 88巻, 1018号, pp.11-16, 1972.
- 2) 西田正, 江崎哲郎ら: 地下空間形成による地盤移動の研究(第1報), 日本鉱業会誌, 96巻, 1109号, pp.455-460, 1979.
- 3) 西田正, 亀田伸裕: 浅所陥没の発生機構に関する研究(第4報), 日本鉱業会誌, 99巻, 1145号, pp.27-32, 1983.
- 4) 江崎哲郎ら: 地下空間開発に関連した地盤環境の予測及び評価のための解析手法, 地下空間シンポジウム, pp.109-116, 1994.
- 5) 浅所陥没発生機構の解明及び復旧対策工法の確立に関するガイドブック, 共同研究成果報告書, 九州大学工学部, NEDO, 1997.
- 6) 堂園俊多, 江崎哲郎: 地下利用と外部環境, 地下空間利用シンポジウム, pp.4-6, 1992.
- 7) 西田正, 亀田伸裕: 鉱害地区の地盤の変位〔各論〕, 基礎工, 第11巻, 10号, pp.55-62, 1983.9.
- 8) 西田正, 亀田伸裕: 浅所陥没の発生機構に関する研究(第3報), 日本鉱業会誌, 95巻, 1096号, pp.331-336, 1979.
- 9) 中村和郎他: 地理情報システムを学ぶ, 古今書院, 1998.
- 10) 吉中龍之進他: 大谷石地下採掘空洞の岩盤破損について, 第6回岩力シンポジウム論文集, 314, pp.281-286, 1984.
- 11) 横山幸満他: 堆積軟岩(大谷石)地下空間の陥没メカニズムの研究, 平成4-5年科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果報告書, 04452223, 1993.3.
- 12) 宇都宮市役所都市計画白図 1/2500 地形図.
- 13) 安藤武, 岡重文: 大谷石の地質と採掘に関連する破壊状況, 地質調査所月報, 第18巻, 第1号, pp.1-37.
- 14) 横山幸満他: 大谷地区陥没のメカニズム, 土木学会論文集, No.568/III-39, pp.113-123, 1997.