WEB ブラウザ上での表示に適した配信地図データの作成技法とその応用
Methods to Produce Tiled Maps and their Application

地理空間情報部　小清水寛・高桑紀之
Geospatial Information Department　Hiroshi KOSHIMIZU and Noriyuki TAKAKUWA

要　旨

国土地理院が整備する地図画像，写真画像等の種類・解像度・投影法・形式は多様である．これらオリジナルデータは，例えば地図であれば図葉単位で仕切られ，場合によっては整飾等を付したうえで，閲覧に供される．オリジナルデータを印刷して紙として取り扱う分にはこのような提供方法が最善であると思われるが，デジタル化された情報として WEB ブラウザ上で表示する場合において，様々な縮尺レベルで，シームレスに閲覧したいという一般ユーザの新たなニーズに応えることが出来ない．そこでオリジナルデータを，画像をタイル状に並べた，WEB ブラウザ上での表示に適した形式に変換する必要がある．本報告では，様々な WEB 地図表示サービスのデファクトスタンダードとなっており，電子国土 Web システム Version4 でも採用されている配信タイルデータの仕様について明確にしたうえで，多種多様なオリジナルデータからタイル状データを作成する原理（共通の仕組み）について記述する．次いで，この原理を様々な種別のオリジナルデータに適用したタイル状データ作成事例を記述する．最後に，オリジナルデータからタイル状データを作成する上での中間成果品を利活用することによって新たな形式の地理空間情報サービスを編み出し，ユーザニーズの発掘に結びつけた事例についても応用として紹介する．

1. はじめに

国土地理院は，その前身の陸地測量部が設置された明治時代以降，様々な地理空間情報を整備してきた．地理空間情報としては，地図画像や写真画像が主であったが，最近では単純に画像化できないベクトル形式のデータのほか，メッシュ化された高精度の数値標高データなども含まれるようになった．整備した地理空間情報の供覧や提供にあたっては，印刷によるものに加えて，WEB ブラウザ上でも効率的に表示できるような配信が必要となっている．後者については，個別の画像や数値化データをダウンロードする仕組みを整えることも重要であるが，それに加えてデータの価値を WEB ブラウザ上でより効果的に表現できるようなデータ配信の仕組みを整えることも重要となってきた．効果的な表現としては，同じ地図情報を様々な縮尺の元でシームレスに見せることや，数値化データそのものを地図上で分かりやすく可視化することが考えられる．このうち，最新の地形図については，ベクトル形式のデータを画像化し，データ配信する仕組みを検討してきた．しかしながら，それ以外の価値ある膨大なデータ（空中写真画像・旧版地図画像・数値標高モデルメッシュデータ等）に関しては， WEB ブラウザでの表示に適した画像化および可視化方法の国土地理院内での検討は限定的であった．本報告では，様々な種別・解像度・投影法を有する国土地理院の空中写真画像のうち電子国土基本図（オルソ画像）と災害時オルソ画像、並びに旧版地図画像、数値標高モデルメッシュデータを対象として，WEB ブラウザでの表示に適した地理空間情報の画像化および可視化方法について，特に 2010 年以降取り組んできた作業を基に，その方法論を体系的に分類整理して提示する．

2. 配信用タイル状データの仕様

本節では，様々な WEB 地図サービスで用いられるタイル状データ（以下，「配信タイル」という．）の規格について，Microsoft 社が公開している「Bing Maps Tile System」を基に紹介する．Google Maps や Yahoo!の地図サービスなどの既存の民間サービスのほか，電子国土 Web システム Version 4 の配信タイルデータもこの規格と同等のものを採用している．

本規格を特徴付ける考え方の出発点は，全球（両極等の特異点近傍を除く）の地表投影面を正方形のタイルでシームレスに被覆するという点にある．また大縮尺表示において，建物などの地物が適切な形状を保ったまま表示できるよう，局所的な形状が極力維持される正角投影の要件を持つことが望ましい．更にタイルを埋める地理空間情報を別の投影座標系から簡単に作成できる（このことは，後述するように，投影座標から経緯度への逆変換が解析関数として合理的に構成できることとほぼ同値である）ことも望ましい．これらの要件を満たす投影法として本規格では真球メルカトル投影法を採用している．

本規格では（大域的な）縮尺の概念は存在しないが，Web ブラウザ上で段階的に表示する都合上，代替する概念として「ズームレベル（*ZM*）」が存在する．地表面を様々な縮尺相当量で表現するには，正方形のタイルのサイズもしくは被覆枚数を変化させる必要がある．本規格では，タイルサイズは 256×256

ピクセルに固定されおり，被覆枚数を変化させることによって縮尺相当量を操作することができる．例えば，ズームレベルを大きくする（被覆枚数を大きくする）ことでタイル一枚当たりの表示内容が詳細になり，より大縮尺の表現ができるようになる．

さらに本規格では，正方形タイルの貼合わせ枚数は東西方向と南北方向同数で，その個数は 2 の階乗（$=2^{ZM}$）になっている．例えば ZM=3 では，図-1 のように東西，南北 8 枚ずつに並べて，地球表面を表示する．ZM=4 では，16 枚ずつになる．

このような仕組みから，ズームレベルを 1 段階切り下げる際に，隣接する 4 枚のタイルを合成して縦横 50%縮小することで，より小さいズームレベルのタイルを効率的に生産することができるとともに、WEB ブラウザ上での縮小･拡大表示アルゴリズムもシンプルになる．ただし，その場合注記がつぶれたり，線がかすれたりしないよう画質の劣化防止を考慮する必要がある．

なお，正方形タイルの貼合わせ枚数を東西方向と南北方向で等しくするには，高緯度地帯を地表投影面から削除する必要がある．その閾値は計算により北緯／南緯約 85.05 度となることが示される．

各タイルは，図-1 のようにズームレベル（ZM）によって決まるタイルの配置，及び地表の特定の位置（-180°，約 85.05°）を画像原点として並べられた 2 次元の番号（TX，TY）（以下「タイル座標」という．）の，TX，TY，ZM の 3 要素によって地表のタイルの位置を完全に指定することができる．

次に地表の特定の地点の経緯度と，並べられたタイルの画像として表示される画素との間に 1:1 の関係を構築することを試みる．

本規格において画素は二つあり，ひとつは，（TX，TY，ZM）を指定して得られる 256×256 ピクセルからなる正方形タイルの個々の画素で，（北西端を基準とする）画素座標（px，py）とする．ふたつめは，特定のズームレベル ZM に属する正方形タイルを貼り合わせて得られる全球地表面（85.05 度以上の高緯度地方を除く）の合成画像の画素で，画素座標（wpx，wpy）とする．ZM が与えられたときに，タイル座標，タイル画素座標（TX，TY，px，py）並びに合成画像の画素座標（wpx，wpy）の間には簡明な規則が存在する：

$$Wpx=256\times TX+px,\quad wpy=256\times TY+py$$
$$TX=[wpx/256],\quad TY=[wpy/256]\ ,$$
$$Px=wpx\ \%\ 256,\quad py=wpy\ \%\ 256$$

（$[x]$は実数 x 以下の最大の整数値を，x % y は整数 x を整数 y で割った剰余を示す）

さて，ズームレベル ZM が指定された時に，（wpx, wpy）とその地点の経緯度（L[rad]，B[rad]）の間には以下の 1：1 の関係が成立する：

$$(wpx, wpy)=\left(\frac{L+\pi}{2\pi}\cdot W,\left[\frac{1}{2}-\frac{1}{4\pi}\log_e\left(\frac{1+\sin B}{1-\sin B}\right)\right]\cdot H\right)$$

$$(L,B)=\left(\pi\cdot\left[\frac{2wpx}{W}-1\right],\arcsin\left[\frac{\exp\left(2\pi\left(1-\frac{2wpy}{H}\right)\right)-1}{\exp\left(2\pi\left(1-\frac{2wpy}{H}\right)\right)+1}\right]\right)$$

$$W=H=256\cdot 2^{ZM}$$

第 2 式は，第 1 式の逆変換として求まる．第 1 式は正角投影条件の導く常微分方程式を解くことによって得られる．なお削除すべき高緯度地方の緯度閾値 85.05 度は，第一式で wpy=0 とおくことによって得られる．なお，緯度 B[rad]における画素寸法 d は，地球半径（長半径）を R として，$d=2\pi R\cos B/256\cdot 2^{ZM}$ によって得られる．

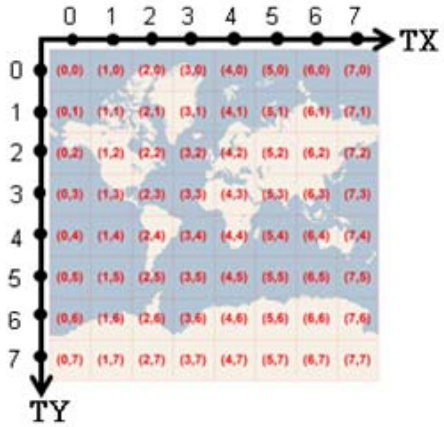

図-1　配信タイルの仕様（ZM=3）

3. 配信タイル作成原理

3.1 直接的作成と間接的作成

オリジナルデータには，矩形とは限らない様々な形状が含まれるが，ここでは画像データとして矩形分割されたオリジナルデータのみを扱い，それを「オリジナルタイル」と呼ぶ．

オリジナルタイルから配信タイルを作成する工程は，端的に言えば画素の再配置（座標変換・補間）に他ならない．

配信タイルは，拡大／縮小表示に合わせて複数のズームレベルを設定することが可能である．ズームレベルの範囲の設定にあたって考慮すべきポイントは，画質の劣化及びタイル作成コストを極力抑制することである．複数のズームレベルの配信タイルの作成においては，オリジナルタイルから直接配信タイルを作成する場合を直接的作成と呼び，既に作成

した配信タイルを二次加工することで，別のズームレベルの配信タイルを作成する場合を間接的作成と呼ぶ．

直接的作成においては，オリジナルタイルと配信タイルの解像度（画素寸法）に大きな乖離が生じないようにズームレベルを設定する必要がある．もしオリジナルタイルに対して配信タイルの解像度がかなり小さく設定された場合には，情報の損失が発生し，配信用タイルにノイズが発生してしまう（図-2）．

図-2　直接的作成ーオリジナルタイルと配信タイルの解像度の乖離が大きい場合（上）と小さい場合（下）

ズームレベル ZM_{direct}-1, ZM_{direct}-2, …の配信タイルについては，ひとつ上のズームレベルのタイル 4 枚を貼り合わせた上で，縦・横方向に各々50%縮小する画質を考慮した画像処理によって，間接的に作成することができる（図-3）．

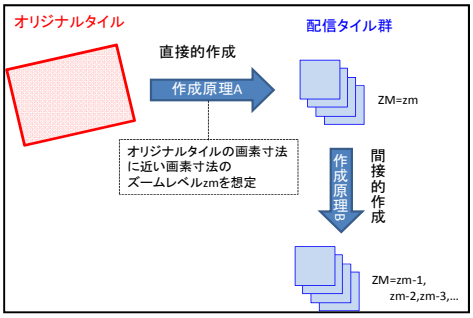

図-3　直接的作成と間接的作成

3.2 直接的作成（作成原理 A1）

配信タイルの作成にあたっては，データの存在領域が隣接する複数のオリジナルタイルをまたぐ場合がある．隣接するオリジナルタイルが規格化されている場合には，オリジナルタイルの接合を取ってから処理することが合理的である．このような考え方に基づくタイル作成方法を作成原理 A1 と呼ぶ．

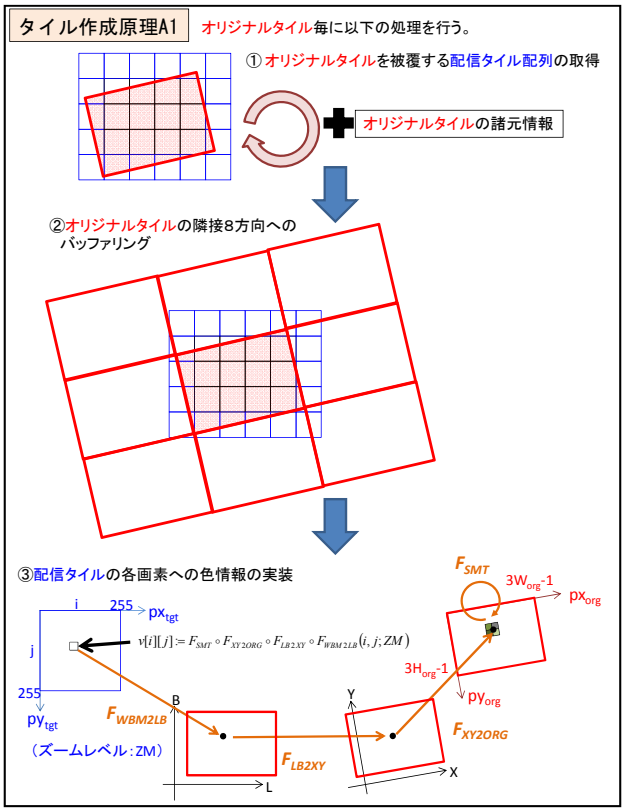

図-4　配信タイル作成原理 A1

オリジナルタイルからズームレベル ZM の配信タイルを作成するにあたっては，まずオリジナルタイルに付随する参照情報を取得する必要がある．参照情報とは，オリジナルタイルの四隅経緯度や画素数等を直接ないし間接に取得できる情報であり，ワールドファイルのように別ファイルとなっている場合もあれば，オリジナルタイルの命名規則から計算で

きる場合もある．この情報に基づいて，現在作業中のオリジナルタイルを被覆する配信タイルの配列を取得する（図-4①）．次に，現在作業中のオリジナルタイルを隣接 8 方向にバッファリングして予め接合を取るよう画像合成する（図-4②）．オリジナルタイルが存在しない隣接方向には，透明色（現実に存在しない色）を補間する．以上の準備を施した上で，被覆配信タイル毎に合成オリジナルタイルを参照して画素情報を実装する作業を以下のように行う（図-4③）．

配信タイル（TX，TY）の画素座標（i，j）に対し，対応する経緯度（L_{ij}，B_{ij}）を第 2 節の変換式を用いて求め（写像 F_{WBM2LB}），さらに合成オリジナルタイルの準拠する座標（X_{ij}，Y_{ij}）に変換する（写像 F_{LB2XY}）．ここで座標系（L，B），（X，Y）は右手系としていることに留意していただきたい．更に，（X_{ij}，Y_{ij}）を合成オリジナルタイルにおける実数値画素座標（px_{ij}，py_{ij}）に変換する（写像 F_{XY2ORG}）．最後に，この実数値画素座標の近隣 4 画素を合成オリジナルタイルから取得し，（px_{ij}，py_{ij}）における Bilinear 補間画素値 v_{ij} を取得する（写像 F_{SMT}）．この画素値 v_{ij} を配信タイル（TX，TY）の当該画素座標（i，j）に実装する．

3.3 直接的作成（作成原理 A2）

オリジナルタイルの画素数が大きすぎてバッファリング合成するためのメモリ空間を確保することが困難な場合，互いに隣接するオリジナルタイルの仕様に差異がある場合などには，前述の作成原理 A1 をもう少し原理的でロバストな方法に置き換える必要がある．これを作成原理 A2 と呼ぶ．

現在作業中のオリジナルタイルを被覆する配信タイル配列を取得する（図-5①）ところまでは原理 A1 と同じであるが，オリジナルタイルのバッファリング合成工程を省略し，被覆配信タイル毎に（単一の）オリジナルタイルを参照した画素情報実装を施す．但し，Bilinear 補間画素値 v_{ij} が得られない場合，v_{ij} には nearest neighbor 補間画素値を当てはめ，それすら不可能な場合には透明色画素値を当てはめることとする（図-5②）．以上の工程をオリジナルタイル毎に行った場合，互いに隣接するオリジナルタイルをまたぐ配信タイルが，同一タイル番号について複数発生するが，ひとつの配信タイルの透明色画素を他の配信タイルデータの画素で塗りつぶす画像処理を繰り返すことによって，1 枚の完全な配信タイルを仕上げる（図-5③）．

もしオリジナルタイルの隣接部が重複していても，タイルへの画素書き込み時の優先順位決定を適切に設定すれば，理論上問題なく配信タイルに画素を書き込める．例えば配信タイルのある画素は，平面直角座標系の 9 系からのものと 10 系からのものが考えられるが，これは優先順位の問題に帰することができる．今回の場合，透明画素（まだ必要な画素が参照できていないという情報）を利用することで，優先順位の制御をしているのである．

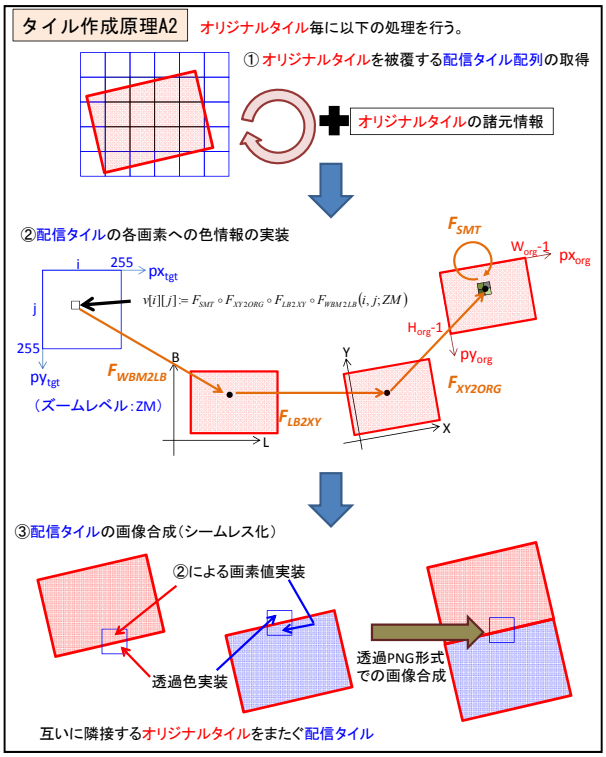

図-5　配信タイル作成原理 A2

3.4 間接的作成（作成原理 B1／B2）

ズームレベル ZM+1 の配信タイルデータセットが，作成原理 A1／A2 によってオリジナルタイルから作成済みであることを前提として，ズームレベル ZM の配信タイルを作成するための原理を記述する．それは，ズームレベル ZM+1 における 4 つの隣接配信タイルを画像合成し，縦・横 50%に縮小することに尽きるが，画像縮小の際の 2 通りの補間方法（B1／B2）がこの原理のキーとなる（図-6）．

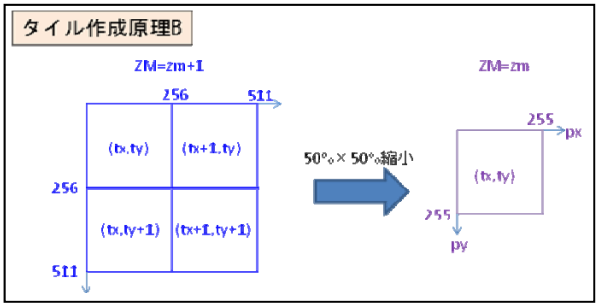

図-6　配信タイル作成原理 B1/B2

B1：陰影段彩図やオルソ画像のように色彩が連続的に変化する場合には，Bilinear 補間によって補間処

理を行う．配信タイルは正方形であって画素数が 2 の階乗（=256）であるため，Bilinear 補間とは，合成タイルの隣接 4 画素を単純平均することに他ならない：

$$v(px, py; ZM) = \frac{1}{4}\sum_{i=0}^{1}\sum_{j=0}^{1} v(2px+i, 2py+j; ZM+1)$$

問題は，特にオルソ画像のように画像フォーマットが JPEG 形式である場合において，本処理を反復して更にズームレベル *ZM*-1，*ZM*-2，･･･の配信タイルを作成する際に変換函数（JPEG であれば離散余弦波）による画質の劣化が蓄積してしまうことである．実は先の式を漸化的に適用することによって画質劣化蓄積を回避することが可能である：

$$v(px, py; ZM) = \frac{1}{4^k}\sum_{i=0}^{2^k-1}\sum_{j=0}^{2^k-1} v(2^k \cdot px+i, 2^k \cdot py+j; ZM+k)$$

この式はズームレベル *ZM*+*k* の配信タイルの存在を仮定して，ズームレベル *ZM* の配信タイルデータを画質の劣化を最小限にとどめつつ直接作成できることを示している．

B2 : 画像縮小に利用するバイリニアやバイキュービックなどの一般の補間法では，特定の狭い画素エリアで色情報が激しく変化する注記等の文字部分については，判読不能なまでの文字崩れが発生する可能性が高い．そこで，補間法に合わせて特殊な画像処理が必要である．

本作業では，Java（JDK1.6.*）の描画ライブラリに実装されている画像を滑らかにする‘SCALE_SMOOTH’処理を利用することで，文字の崩れを抑制した．または，Photoshop のような画像処理ソフトであればアンシャープマスクなどの色差を強調するフィルタを利用することでも同様の効果を得ることができると考えられる．ただし補間方法や画像処理方法によっては，中間色が増え出力される配信タイルのデータ容量が嵩んでしまうことがあり，画質とデータ容量はトレードオフの関係を理解した上で，適切な処理方法を選択する必要がある．

4. 配信タイル作成原理の適用

本節では，第 3 節で記述した作成原理を個別のプロダクト（オリジナルタイル）に適用して配信タイルデータを作成する具体的な処理方法を説明する．

4.1 電子国土基本図（オルソ画像）

本配信タイルについては，ズームレベル *ZM*=18（および 19）を作成原理 A1／A2 によって作成し，*ZM*=17, 16, 15, …, 12 を作成原理 B1 によって作成する．以下，作成原理 A1／A2 の適用について記述する．

オリジナルタイルは経緯度方向に一律 30 秒間隔で仕切られているが，タイルの縦横画素数（W_{org}，H_{org}）は，（3750，4650）と（1875，2325）の二種類存在する（地上画素寸法は，緯度によって異なるが概ね前者は 20cm，後者は 40cm である）．オリジナルタイルの四隅経緯度は，そのタイルの命名規則から単純な四則演算によって取得可能である．また準拠する座標は経緯度座標であることから，F_{LB2XY}=id である．

互いに隣接するオリジナルタイルが同一解像度であるような領域内では，原理 A1 を適用することが可能である．この場合，

$$F_{XY2ORG}(L,B) = (3W_{org}\cdot(L-L_0)\cdot 3600/90,\ 3H_{org}\cdot(B_0-B)\cdot 3600/90)$$

（L_0，B_0）は合成オリジナルタイルの北西端経緯度である．

他方，互いに隣接するオリジナルタイルが異なる解像度であるような場所では，原理 A2 を適用せざるを得ない．この場合，

$$F_{XY2ORG}(L,B) = (W_{org}\cdot(L-L_0)\cdot 3600/30,\ H_{org}\cdot(B_0-B)\cdot 3600/30)$$

（L_0，B_0）は現在作業しているオリジナルタイルの北西端経緯度である．

作成された配信タイルの事例を図-7 に示す．

図-7　電子国土基本図（オルソ画像）配信タイル
矩形枠が 1 枚のタイル（*ZM*=18）を示す

4.2 災害時オルソ画像

本配信タイルについては，ズームレベル *ZM*=18

（および 19）を作成原理 A2 によって作成し，ZM=17, 16, 15, …, 12 を作成原理 B1 によって作成する．以下，作成原理 A2 の適用について記述する．

オリジナルタイルは平面直角座標系上で国土基本図の図郭と同じ経緯度方向に一律東西 2km，南北 1.5km の矩形で仕切られているが，タイルの縦横画素数（W_{org}, H_{org}）はやはり（10000, 7500）と（5000, 3750）の二種類存在する（地上画素寸法は，前者は 20cm, 後者は 40cm である）. タイルの四隅経緯度は，タイルに付随するワールドファイルから一定の規則に従って計算可能である．特に，タイルの準拠する座標は平面直角座標であることから，F_{LB2XY} は経緯度から平面直角座標への座標変換である．

本オリジナルタイルは画素数が大きく，互いに隣接するオリジナルタイルが異なる解像度であるような場所も含まれることから，一律に原理 A2 を適用して配信タイルを作成する．この場合，

$$F_{XY2ORG}(X,Y) =(W_{org}\cdot(X-X_0)/2000, H_{org}\cdot(Y_0-Y)/1500)$$

（X_0, Y_0）は現在作業しているオリジナルタイルの北西端経緯度である．

作成された配信タイルの事例を図-8 に示す．

図-8　災害時オルソ画像配信タイル（ZM=18）

4.3 旧版地図画像

旧版地図画像の縮尺は 1/5000～1/500 万と多種多様であり，縮尺等に合わせた様々な投影法や図郭形状で表現されている．またズームレベルも縮尺に合わせて設定する必要がある．本作業においては，オリジナルタイルと同程度の画素寸法を有するズームレベル ZM の配信タイルを作成原理 A2 によって作成し，ZM-1, ZM-2, …のズームレベルを作成原理 B2 によって作成する．作成原理 A2 を適用するのは，隣接するオリジナルタイルの仕様に差異があるなど前もっての接合処理が難しい場合があり，またオリジナルタイルの画素数が大きく，本作業で利用しているプログラムの動作環境の制限のためである．

旧版地図画像のオリジナルデータを作成原理 A2 に従って作成するためには，旧版地図画像特有の事情を考慮したいくつかの追加的処理を踏まえた工程の設計が必要である．

4.3.1 図郭内部の切り抜き

旧版地図画像のオリジナルタイルは，描画地図範囲を示す図郭内部に加え，整飾部なども含めて画像化されている（図-9）．このため，配信タイルを作成するためには図郭内部のみを取り出す画像処理が必要である．

処理方法としては，$(L_{ij}, B_{ij})=F_{WBM2LB}(i,j)$，$v_{ij}=F_{XY2ORG}\cdot F_{LB2XY}(L_{ij}, B_{ij})$として，以下の 2 通りが考えられる：

方法 1：図郭四隅の経緯度を取得した上で，(L_{ij}, B_{ij}) が四隅経緯度の構成する矩形に包含されていない場合に，$F_{SMT}(v_{ij})$には透明色をフラグとして当てはめる．

方法 2：図郭四隅の画素座標を取得した上で，v_{ij} が四隅画素座標の構成する矩形に包含されていない場合に，$F_{SMT}(v_{ij})$には透明色をフラグとして当てはめる．

方法 1 は，緯線経線に平行な図郭を持つような図葉に有効であり，緯度経度座標において長方形になることが一般である. 例えば 20 万分 1 地勢図が該当する．

方法 2 は，印刷または画像化されたデータの図郭線が直線分で構成されている場合に有効である．例えば，2 万 5 千分 1 地形図が該当する．方法 2 の場合多くの図郭は台形等の四角形であるため，その包含判定には計算幾何的な処理（符号付三角形面積の計算）が必要である．

4.3.2 測地基準系

旧版地図画像の図郭経緯度が日本測地系に基づく場合には，世界測地系から日本測地系への経緯度変換写像（F_{trnsLB}）を用いて，F_{WBT2LB} を $F_{trnsLB}\cdot F_{WBT2LB}$ で置き換える必要がある．

4.3.3 投影変換 F_{LB2XY}

縮尺が 1/2.5 万，1/5 万，1/20 万の場合には UTM 投影を採用し，縮尺 1/500 万の場合には日本経緯度付近（L_0, B_0）を投影主点とする斜軸の正距方位図法への投影変換を採用する. 縮尺 1/50 万の場合には正角割円錐図法への投影変換が必要である．投影法などが不明の場合，緯線，経線方向に直交するよう標定要素を基にした変形処理が必要である．その場合

の処理については，4.3.5 節で後述する．なお，同一縮尺であっても整備年代によっては異なる投影法を採用している場合もあり，その取り扱いについては未着手であり，今後の検討課題となっている．

斜軸法の正距方位図法への投影変換について補足する．球面三角形の余弦公式により，通常の経緯度（L[rag], B[rad]）は，投影主点を（L_0, B_0）にもつ斜軸法では，

$$B_{new}=\arcsin\{\sin B_0 \sin B+\cos B_0 \cos(L-L_0)\}$$
$$L_{new}=\arccos\{(\sin B_0 \sin B_{new} - \sin B)/\cos B_0 \cos B_{new}\}$$

に変換される．そこで，$\sin(L-L_0)<0$ ならば L_{new} に -1.0 を乗じる処理を施した上で，

$$X=(\pi/2-B_{new})\cdot\sin L_{new},\ Y=(\pi/2-B_{new})\cdot\cos L_{new}$$

と変換することにより F_{LB2XY} が求まる（政春, 2011）．

4.3.4 線形標定 F_{XY2ORG}

旧版地図画像のオリジナルタイルは，紙地図をデジタイズしたものであるため，図郭内部を投影変換した後も，写像 F_{XY2ORG} によって画素座標との対応関係をつけるにあたっては，伸縮・回転等の歪みを線形標定（アフィン変換）によって調整することが望ましいと思われる：

$$\begin{bmatrix} px \\ py \end{bmatrix} = F_{XY2ORG}\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ d & e \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c \\ f \end{bmatrix}$$

例えば，図郭四隅の投影座標と画素座標 $\{(X_i, Y_i, px_i, py_i)\}_{1\leqq i\leqq 4}$ が既知の場合には，（a, b, c, d, e, f）の最小二乗解（a^, b^, c^, d^, e^, f^）は以下によって求められる：

$$\begin{bmatrix} a^\wedge \\ b^\wedge \\ c^\wedge \end{bmatrix} = \left(A^T A\right)^{-1} A^T \begin{bmatrix} px_1 \\ px_2 \\ px_3 \\ px_4 \end{bmatrix} \qquad A = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & 1 \\ X_3 & Y_3 & 1 \\ X_4 & Y_4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d^\wedge \\ e^\wedge \\ f^\wedge \end{bmatrix} = \left(A^T A\right)^{-1} A^T \begin{bmatrix} py_1 \\ py_2 \\ py_3 \\ py_4 \end{bmatrix}$$

4.3.5 投影変換が不明な場合

一般に投影変換 F_{LB2XY} は，投影主点の近傍で高次多項式展開することが可能であることから，線形標定 F_{XY2ORG} との合成写像 $F_{XY2ORG}\cdot F_{LB2XY}$ をまとめて高次多項式標定として求めればよい．例えば，3 次多項式標定：

$$\begin{bmatrix} px \\ py \end{bmatrix} = F_{XY2ORG}\cdot F_{LB2XY}\begin{bmatrix} L \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 L^3 + p_2 L^2 B + \ldots + p_9 B + p_{10} \\ q_1 L^3 + q_2 L^2 B + \ldots + q_9 B + q_{10} \end{bmatrix}$$

を採用する場合には，経緯度と画素座標（L_i, B_i, px_i, py_i）が既知である点（経緯度線の交点や図郭四隅）を $n\geqq 10$ 点用意し，4.3.4 節と同様の計算により（p_i, q_j）の最小二乗解（p_i^, q_j^）が求まる．

4.3.6 参照情報

旧版地図画像のオリジナルタイルは，描画地図範囲を示す図郭内部に加え，整飾部なども含めて画像化されているため，図郭内部に関する参照情報の整備コストは他の事例よりも高い．また，参照情報の内容は配信タイル作成の目的を達成するために十分な情報が盛り込まれていなければならない．投影座標系，測地基準系，整備時期などのメタデータ的情報に加え，特に配信タイル作成アルゴリズムにとって必要不可欠な参照情報とは，①配信タイル配列の取得，②図郭内部の切り出し，③標定，を行うために十分な情報のことである．

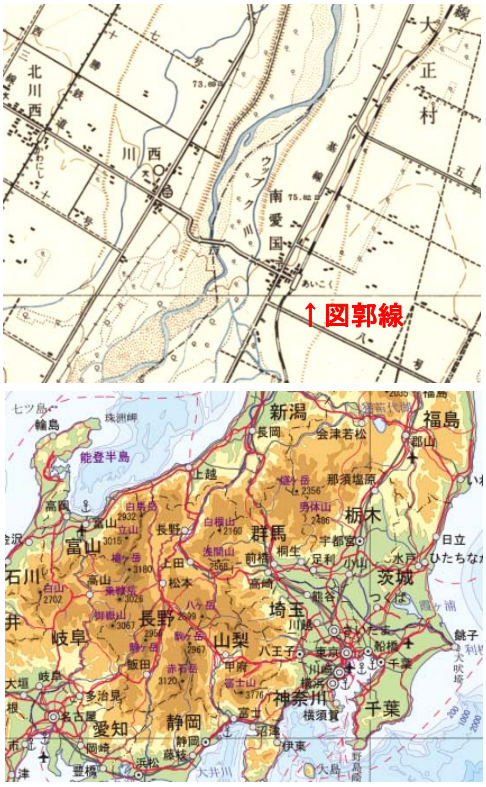

図-9　旧版地形図等の配信タイル
（上）1/5 万，昭和 31 年（ZM=14）
（下）1/500 万，平成 22 年（ZM=7）

まず，投影変換 F_{LB2ORG} の具体形が求まる場合を考察する．①②③の目的を満たす最も合理的で安価な参照情報は，図郭 4 隅の正確な経緯度と画素座標である．仮に図郭 4 隅の正確な経緯度が分からない場合でも，目的①のためには図郭四隅の概略経緯度が，目的②のためには図郭四隅の正確な画素座標が必要である．加えて，目的③に資する経緯度が既知の画素座標（経緯線交点等）が 3 点以上取得される必要がある．

投影変換 F_{LB2ORG} の具体形を求めるのが困難な場合には，図郭四隅の概略経緯度，画素座標に加えて，経緯度が既知の画素座標（経緯線交点等）が 10 点以上バランスよく取得される必要がある．

作成された配信タイルの事例を図-9 に示す．

4.4 数値標高モデルメッシュデータ

配信タイルとは，（*TX*, *TY*, *ZM*）を指定して得られる矩形領域を縦横 256×256 画素のメッシュに分割し，各メッシュに色情報を実装するものである（第 2 節）．本事例では，（*TX*, *TY*, *ZM*）を指定して得られる矩形領域を縦横 256×256 画素のメッシュに分割し，各メッシュには（当てはめるべき色情報の元となる）標高値情報を実装する中間生成タイル（以下「参照用標高タイル」と呼ぶ）を利用した．

オリジナルタイル（数値標高モデルメッシュデータ）のメッシュサイズは約 5m（0.2 秒），約 10m（0.4 秒）など多種多様であるが，オリジナルタイルのメッシュサイズと同程度（メッシュサイズよりもやや小さめとやや大きめの二種類）の画素寸法を有するズームレベル *ZM*+1, *ZM* の参照用標高タイルを作成原理 A1 によって作成し，これを陰影段彩図作成の画像処理アルゴリズムを用いて配信タイル化する．

更に，ズームレベル *ZM* の配信タイルを出発点として，ズームレベル *ZM*-1, *ZM*-2, …のズームレベルを作成原理 B1 によって作成する．

以上が配信タイル作成工程の大まかな概要であるが，個々の工程や後処理については以下に詳述する．

4.4.1 参照情報

数値標高モデル（5m メッシュ）の場合を事例に説明する．各オリジナルタイルは 3 次メッシュで仕切られた矩形範囲をカバーし，3 次メッシュ名がタイルに割り当てられる．この矩形範囲が横方向 225 個，縦方向 150 個の 0.2 秒間隔格子に分割され，各格子の中心点にはモデル標高値が実装されている．

4.4.2 参照用標高タイル作成

上述のように作成原理 A1 に従う．ここで，Bilinear 補間写像 F_{SMT} は，オリジナルタイルの最近隣 4 格子点におけるモデル標高値の平滑化であり，1 点でも欠測がある場合には平滑化値も欠測扱いとするような処理を施している．

4.4.3 配信タイル作成

参照用標高タイル配列から配信タイルを作成する工程を説明するためには，陰影段彩の仕組みを理解する必要がある．人間の視覚が地形の起伏を効果的に認識するには，標高値を階層化して彩色するだけではとても足りない．そこで人の網膜神経細胞は，局所的な明暗のコントラストに対して敏感であることを利用して，太陽光線が地表に入射する際に，地表の凹凸の程度や方向によって明るく見えたり暗く見えたりする現象を再現した陰影表示を採用した．地表面を完全拡散面であると仮定した場合に，地表の単位法線ベクトルが $\boldsymbol{n}$ で与えられる地表点における強度 1 の入射光の反射強度 L は $L=\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{S}$ で与えられる．ここで，$\boldsymbol{S}$ は地表から光源方向への単位ベクトルを表す．この反射強度を明暗として認識するためには，H（色相），S（彩度），B（明度）成分に分解された色空間の B（明度）に L を当てはめればよい．標高値については適宜階層化して（H, S）空間に写像すればよい．以上の仕組みを数式で再現してみる．地表が滑らかな曲面 $f(x,y,z)=z-H(x,y)=0$ として表現されるとき，一点（x, y, z）における単位法線ベクトル $\boldsymbol{n}$ は

$$\vec{n}(x,y,z)=\frac{1}{\sqrt{f_x^2+f_y^2+f_z^2}}\begin{bmatrix}f_x\\f_y\\f_z\end{bmatrix}\Bigg|_{(x,y,z)},\ f_x=-\frac{\partial H}{\partial x},\ f_y=-\frac{\partial H}{\partial y},\ f_z=1$$

によって与えられる．ここで，x 軸，y 軸，z 軸は各々東，北，鉛直上を正方向とする．実際には参照用標高値データは離散的な標高値集合 $\{H[px][py]\}_{0\leq px,py<256}$ として取得されているため，$\partial H/\partial x$, $\partial H/\partial y$ は以下のように差分近似される（村井，1999）：

$$\begin{aligned}\partial H/\partial x(px,py)&=\{(H[px+1][py+1]-H[px-1][py+1])\\&\quad+(H[px+1][py]-H[px-1][py])\\&\quad+(H[px+1][py-1]-H[px-1][py-1])\}/6d\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\partial H/\partial y(px,py)&=\{(H[px-1][py-1]-H[px-1][py+1])\\&\quad+(H[px][py-1]-H[px][py+1])\\&\quad+(H[px+1][py-1]-H[px+1][py+1])\}/6d,\end{aligned}$$

（d は当該タイルの画素（px, py）の寸法値）

但し，参照用標高タイルの境界付近でも $\partial H/\partial x$, $\partial H/\partial y$ が計算できるように，参照用標高タイルを隣接 8 方向に予めバッファリングしておく必要がある．

作成された配信タイルの事例を図-10 に示す.

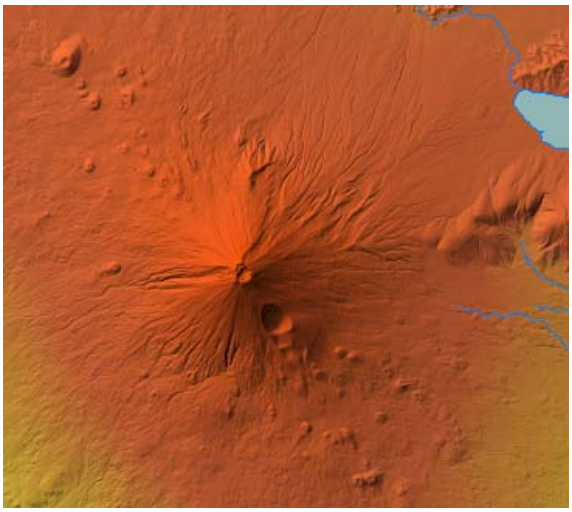

図-10　陰影段彩色図配信タイル（*ZM*＝11）
数値標高モデル（10m メッシュ）を使用

4.4.4 配信タイルのミックス

数値標高モデルメッシュデータを用いて陰影段彩図の配信タイルを作成する場合や数値標高モデルの種別（5m／10m）を固定した場合の作成方法は，4.4.3 節で述べたとおりである．配信タイルを（北方領土を除く）日本全国を被覆するように作成しようとする場合，数値標高モデル（10m メッシュ）は平成 18 年度時点の地形図等高線・標高点データに基づいて全国一律に整備されているが，数値標高モデル（5m メッシュ）に関しては整備範囲が都市部や主要河川流域に限定されており，作成方法も作成時期も地域によって多様である．全国規模の配信タイル作成にあたっては，数値標高モデル（10m メッシュ）をベースとしつつも，標高値精度の高い数値標高モデル（5m メッシュ）を優先的に用いることを目指した（図-11）.

データ処理の原則に従うならば，5m メッシュ由来の参照用標高データと 10m メッシュ由来の参照用標高データを統合し，配信タイルデータを作成すべきである．しかしながら，異なる種別／時期／領域の参照用標高データのオフセット値を調節して唯一の参照用標高データを作成することは後処理では極めて困難である．仮にこれらのオフセットを無視して単純に統合した場合，陰影段彩配信タイルには不連続的な段差が混入してしまう結果を招く（図-12）．これは標高値の陰影成分取得が画像処理の観点からはエッジ抽出の効果をもたらす（4.4.3 節の数式参照）ためである．そこで，本取り組みでは，数値標高モデルの種別毎に陰影段彩配信タイルを作成し，それらを画像合成することにより，接合部分の不自然さを視覚的に軽減するように努めた（図-13）.

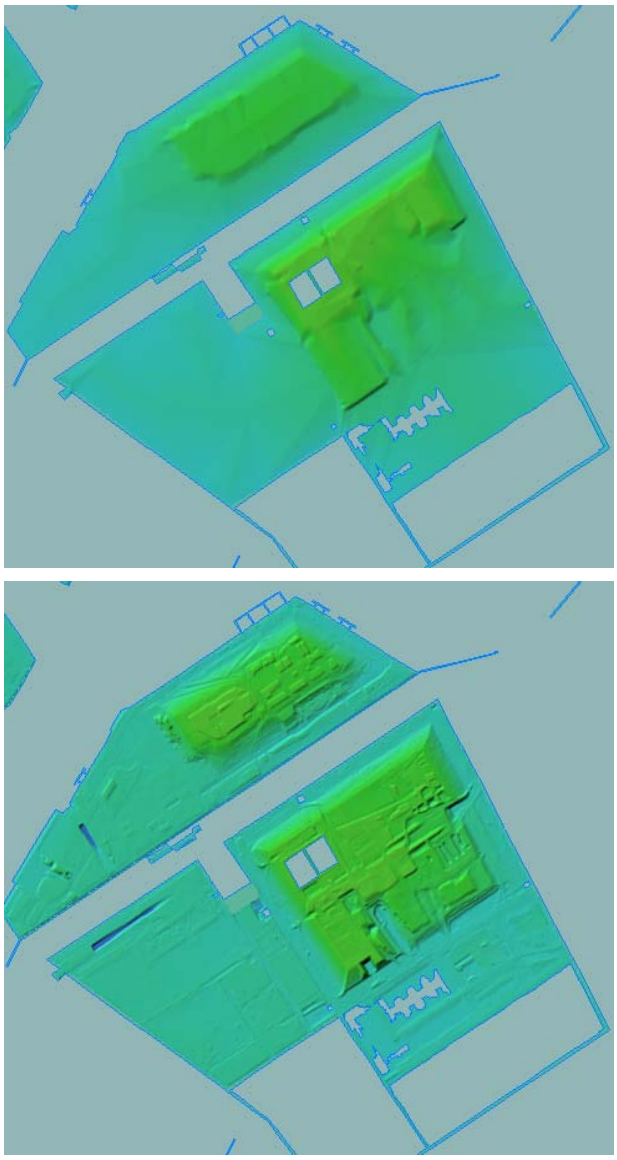

図-11　陰影段彩図配信タイル（*ZM*=14）
（上）数値標高モデル（10m メッシュ）使用
（下）数値標高モデル（5m メッシュ）使用

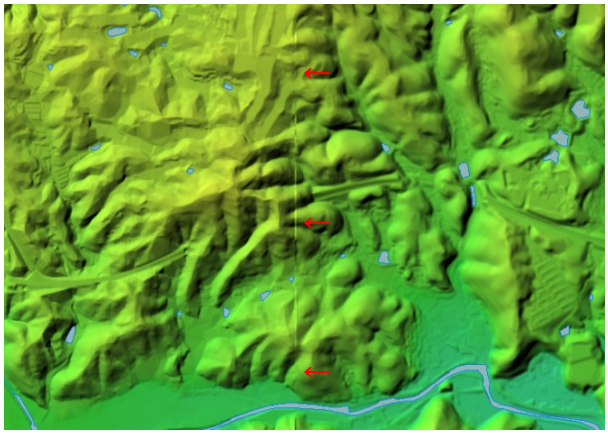

図-12　配信タイルにおける不連続的な段差

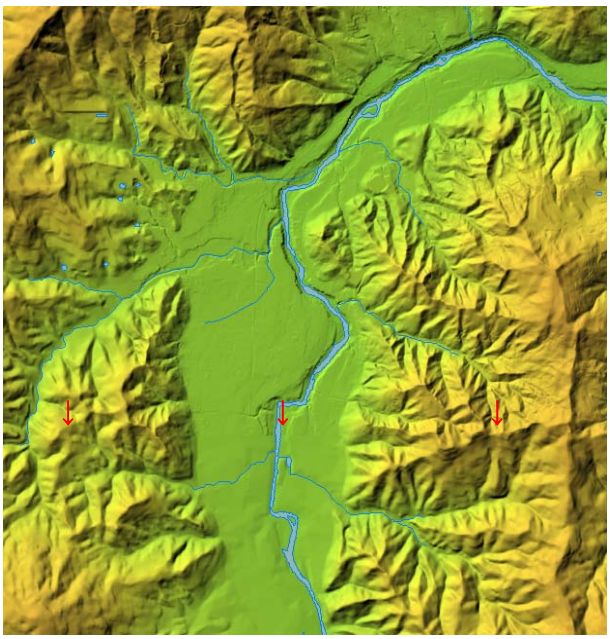

図-13　配信タイル（*ZM*=14）の画像合成
↓は異なるメッシュ由来タイルの合成位置

5. 配信タイル作成原理の応用

一般論として，作成したデータの価値を広く認識してもらう最も効果的な方法は，多数のユーザが簡易な手順で供覧できることである．数値標高モデルを事例にとれば，陰影段彩図の配信タイル作成はそのような提供方法の典型事例を与える．しかしながら，東日本大震災や今後想定される巨大地震，頻発する集中豪雨などを背景として，画像としてだけでなく標高値そのものを地図上で分かりやすくユーザに示すことも有効である．

標高値の表示については，すでに Google Maps API や Mapion の WEB 地図サイト等ですでにサービス化されていたが，特に津波や洪水被害を受けやすい低地において，高精度な標高値データを広範囲にわたって手軽に提供できるサイトはなかった．

国土地理院では，航空機レーザ計測や写真測量による高精度の 5m メッシュ標高データを国土の 5 割強整備し，東北地方太平洋沿岸や南海トラフ沿いの一部を東北大震災後の新しいデータで更新しつつあるため，より災害対応に資する情報提供の一環として，電子国土 Web 上で任意の標高値を表示するサービスの開発を行った．

開発に当たっては，なるべく開発コストをかけることなく迅速にサービスを立ち上げるため，既に作成済みの，配信タイル（陰影段彩図）作成用の標高値が格納された中間データ（以下，「参照用標高タイル」という．）を利用した．参照用標高タイルは，オリジナルタイル（数値標高モデルメッシュデータ）のモデル標高値を平滑化（Bilinear 補間）した値を各画素に実装したものであることから，局所的に起伏の激しい地点では現実の標高値との乖離が増幅される可能性があるが，以下のようなメリットを有する（第 2 節参照）：

- 任意の経緯度を指定したときに，その経緯度を包含する参照用標高タイル位置（ファイル名）と，そのタイル内の所属画素位置（ファイル内の格納位置）を一意に取得することが出来る．特にタイル境界部付近でも隣接タイルを参照する必要がない．
- 参照用標高タイル全体は莫大なデータ量であるが，タイル 1 枚あたりの容量は非常に小さい．

本取り組みでは，数値標高モデルの種別ごとに，参照用標高タイルを作成した．参照用標高タイルのズームレベル（*ZM*）は，5m メッシュ標高に対しては *ZM*＝15（画素寸法 3～4m 相当），10m メッシュ標高に対しては，*ZM*＝14（画素寸法 7～9m 相当）とした（図-14）．

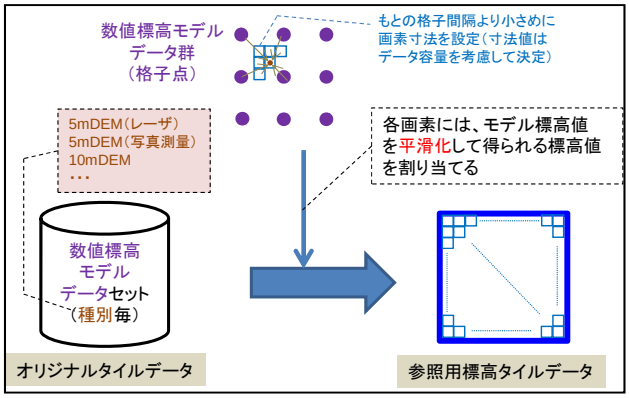

図-14　参照用標高タイルの作成

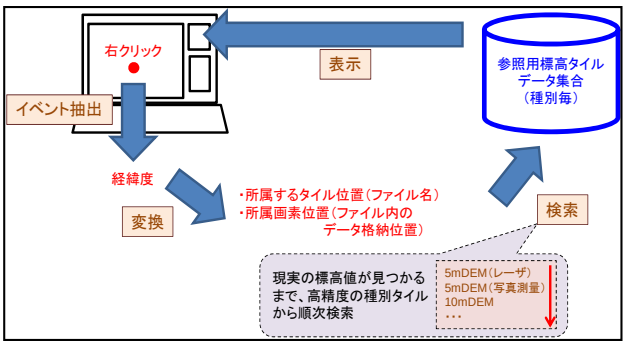

図-15　標高値を取得する仕組み

以上の準備に基づいて，標高値取得・表示サイトを以下のように構築した．Web 地図上でのイベント（具体的には画面の右クリック）を処理することによって，イベント発生地点の経緯度を取得する．この経緯度から，その地点を包含する中間テキストタイルと包含画素が，標高モデル種別毎に一意に特定される．ついで，精度の高い種別由来の中間テキス

トタイル順に標高値を取得し，優位な値が得られた時点で検索を停止し，その値を Web サイトに表示させる．以上のような素朴な仕組みで，背景地図上で標高値を取得する仕組みである（図-15）．

以上の仕組みによって構築した標高値サービスのサイト画面を図-16 に示す．このサイトの活用により，津波災害に備えた避難場所の選定，水害時における氾濫地域や水没危険箇所の予測などに役立つ基礎的な情報が容易に得られ，個人における 防災意識の向上に繋がっていくことが期待される．

図-16　標高値サービスのサイト画面

6. まとめ

国土地理院が整備してきた膨大な地理空間情報（空中写真画像，旧版地図画像，及び数値標高モデルメッシュデータ等）の価値を広く認識してもらう効果的な可視化手法について，実践的な検討作業を行った．

その第一の手法は地理空間情報を WEB ブラウザでの表示に適した形式に画像化することである．最初に，配信タイルデータの満たすべき仕様として，様々な WEB ブラウザ上での地図表示サービスで共通に用いられている仕様を調査し，その特徴を整理した．その上で種別・解像度・投影法などの諸元が様々なオリジナルタイルから，配信タイルを作成する取り組みを行った．オリジナルタイルの緒元に応じた多様な条件の中から，原理的な手法として整理・分類を行うとともに，原理を応用し配信タイルに関する個別の作成事例と，共通の作成原理を比較参照することにより，新たな地理空間情報を WEB ブラウザ上で表示するための配信タイルに変換するための方法論を確立することに成功した．

第二の手法は，地理空間情報そのものを WEB 上で分かりやすく提供するサービスを構築することである．配信タイルの作成原理を数値標高モデルメッシュデータに対して応用することで，標高値そのものを WEB 地図上で取得するサービスを，低コストで構築できることを示した．

今後も，本作業を通じて得られた知見を柔軟に応用することで，国土地理院の様々な地理空間情報について WEB 配信処理を実施していく予定である．

参 考 文 献

Microsoft: Bing Maps Tile System, http://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb259689.aspx (accessed 6 Jul. 2012).
政春尋志（2011）：地図投影法，朝倉書店．
村井俊治（1999）：空間情報工学，日本測量協会．
平井有三（1995）：視覚と記憶の情報処理，培風館．