研究ノート
Study Note

野外現況の記録とパノラマ画像を用いた提示手法について

小　出　良　幸
Yoshiyuki KOIDE

情 報 科 学　第25号（別刷）
札幌学院大学情報科学研究所
札幌学院大学電子計算機センター
２００５

野外現況の記録とパノラマ画像を用いた提示手法について

札幌学院大学　社会情報学部　小　出　良　幸

要旨：広範囲の自然景観を記録するためにパノラマ撮影による手法について概観した．パノラマ撮影には各種のものがあるが，連続撮影された画像と魚眼レンズによる画像からの合成方法が有効である．それらの撮影方法とステッチ方法，閲覧方法についてまとめた．

キーワード：野外現況の記録，パノラマ画像，球形パノラマ，立方体パノラマ，提示手法

１．はじめに

野外調査において調査対象となるものを記録するとき，カメラで撮影されることが多い．かつてはフィルムカメラを使用していたが，現在ではデジタルカメラでの撮影も多い．カメラでの撮影は，対象の一番手軽な記録方法であり，多くの野外研究者が利用している手段でもある．カメラでの記録は，対象を平面として２次元的に記録する手法である．カメラで一度に撮影できる範囲（画角）には限界があり，どうしても制限された記録となる．対象物によっては，それでも充分な場合もあろうが，時には重要な情報を欠損していることがある．

そのような例として，対象物が立体的な物体や，広がる景観などが考えられる．立体物で，なおかつ画角をはみ出る範囲である左右上下や裏側にも重要な情報があるとき，一方からの撮影では限られた情報しか保存できない．それを補うためには，多数の角度から撮影をしていく方法がある．しかしでたらめに撮っていたのでは，位置関係や方位，サイズなど不揃いで不完全な情報としてしか記録できない．必要とあれば採寸，計測しながら図面に記録することがなされる．しかし，作図しながらの調査は手間がかかるし，調査後の室内作業で測定してない箇所の情報が必要となったとき，再度調査地に赴かなくてはならない．できれば，手軽に位置関係や方位，サイズなどの情報が記録しておきたい．簡便だが通常以上の情報記録が，カメラの撮影によってできれば一番手軽の方法といえる．

必要に応じて対象のすべての方向の情報をもれなく記録するためには，いくつか問題点があるが，それを克服する手法がある．

一つは，展開図のように上下左右前後などすべての角度から撮影し，３次元の情報をできるだけ保存するというものである．しかし，３次元の物体を２次元にして展開図のように記録したとき，展開図の中央部に比べて，周辺部は変形し，解像度が落ちる．そのような欠点を補うために，多数の撮影を行い，その画像を立体的にコンピュータ内で復元する合成方法がある（徐，2001）．これについては，重要な手法ではあるが，今回は扱わない．

もう一つは，広域の地形，地質体，景観などの対象を連続的に記録するパノラマ作成による手法である．一方向からの撮影では，通常のレンズを使用したのでは，一度の撮影では記録しきれないことがある．また，より広範囲の撮影するために広角度のレンズを使えば，周辺部で歪みが生じ，現実を忠実に再現できないという弱点もある．それを補うためには，標準レンズによる多数の撮影をして，後で画像合成していくパノラマと呼ばれる手法が用いられることがある．このパノラマ手法は，手軽さ，精度からみて，非常に有効であると考えられる．

本論文では，自然物や自然景観を，カメラで静止画として撮影するという状況を想定して考察していく．特に広画角の景観を撮影記録する方法として，パノラマ撮影をおこない，デジタル画像としてコンピュータで加工合成し，インターネットで公開，閲覧する方法について検討していく．

2．記録の原理

2.1．レンズの焦点距離と画角の関係

カメラは，レンズによって，光をある大きさのフィルムや撮像素子に集め，記録するものである．したがって，得られる画像は，カメラの性能ともいえるレンズとフィルムや撮影素子の能力に大きく依存してくる．

カメラにおいて景観の撮影範囲を決定するものとして，レンズの焦点距離がある．カメラのレンズは複数のレンズが組み合わされているが，全体としては１個の凸レンズの機能を持つようになっている．

凸レンズは，レンズに入ってきた光を集めることができる（図１）．レンズに平行光線（対象物が無限遠にある場合）が入ってきたとき，レンズを光線が通過する際，レンズの屈折率によって光線が屈折し，レンズの光軸部に光線が集まる．凸レンズの集光作用によって，凸レンズの前の景観が結像する焦点面がある．そのような焦点面にフィルムや撮像素子をおけば，鮮明な画像を得ることができる．

カメラのレンズは，全体としては１個の凸レンズになっているが，複数のレンズが組み合わされている．それは，収差を補正して，肉眼で見えるように再現するためである．もちろん全体としては１個の凸レンズになっているため，カメラのレンズだけでも，紙の上にかざせば，レンズの後で（焦点距離に応じて変化する）で結像される．

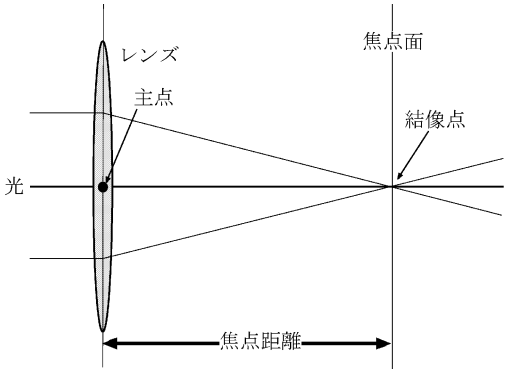

図１　レンズの原理

カメラのレンズでは多数のレンズが組み合わさって一つのレンズとなっている．しかし，複合したレンズが一つの凸レンズと同じ効果を持つ．凸レンズは平行光線がレンズを通り焦点面で結像する．レンズの主点から結像点までの距離を焦点距離と呼ぶ．

レンズの主点（レンズの中心）から焦点面までの距離を焦点距離と呼ぶが，焦点距離の長短によって，写真の画面に写る範囲（画角）が決まる．レンズの屈折率が小さいと焦点距離は長くなり，画角は狭くなる．同じフィルムや撮像素子の中で，狭い画角の像が拡大されて写るため，遠くにあるものも大きく拡大する効果が生じる．このような特性を持つレンズを「望遠レンズ」と呼ぶ．逆にレンズの屈折率が大きく焦点距離が短いと，画角は広くなり「広角レンズ」と呼ばれる．

肉眼に近い画角をもつレンズの焦点距離は，40 mm から 60 mm あたりで，これより焦点距離が短いものを「広角」，長いものを「望遠」と区別している．300 mm 以上の焦点距離のものは，「超望遠」と呼ばれている．

レンズの焦点距離と画角の関係は以下のようにして求められる（岡本，2004）．レンズからフィルムもしくは撮像素子面までの距離，つまり焦点距離を f とし，フィルムもしくは撮像素子面で画像が写る領

域をx，そして写真が写る範囲，つまりレンズにとっての画角（視野角ともいう）θとする（図2 A）と，

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)=\frac{x}{2\cdot f} \quad \cdots\cdots(1)$$

となる．しかし，フィルムもしくは撮像素子のサイズとして，高さ（h），幅（w），対角（d）によって画角の角度は変わりうる（図2 B）．つまり，

x＝h，w，d

となる．上の式をxのそれぞれの値において解けば，レンズの焦点距離から画角を求めることができる．θ（deg）を求める式に変形しておくと，

$$\theta=\frac{180}{\pi}\cdot 2\cdot\tan^{-1}\left(\frac{x}{2\cdot f}\right) \quad \cdots\cdots(2)$$

となる．一般的なレンズの焦点距離と画角の関係を表1に示した．多くのレンズでは，画角を対角にすることが多い．これはレンズが円形で，その直径がほぼdに相当するからである．

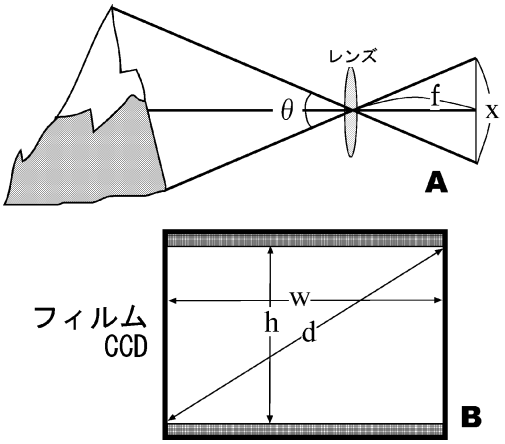

図2　レンズの焦点距離と画角の関係

A：撮影状態．θ：自然景観の画角，f：レンズの焦点距離，x：フィルムあるいはCCD面での自然景観が写る範囲．B：フィルムやCCDでのフレームサイズ．h：高さ，w：幅，d：対角の長さ．

2.2．撮像素子（CCD）について

撮像素子は，電荷結合素子とも呼ばれ，CCD（Charge Coupled Devices）と略されることがある．CCDは，半導体を用いた記憶媒体で，アナログ・デジタル両方の信号を記憶することが可能である．小型でアクセスが速いなどの利点を持っている．CCDの能力は，同じ面積のCCDでは，中に含まれている電荷結合素子の個数と性能に依存する．解像度は素子の数の多いほうが優れているが，小さくなるために色や諧調などの再現性が落ちていく．

CCDのサイズは，対角の長さをインチ単位で表わす．2/3型（インチのこと），1/1.8型，1/2型，1/3型などがある．実際のCCDのサイズは，2/3インチなら，16.933 mmであるはずなのに，カタログでは11 mmと表記されている．これは，撮像管時代の管径を踏襲した表記である．

撮像管は，光を電気信号に変換する真空管の一種である．その撮像管の直径には，2/3インチ，1/3インチなどのサイズがあり，その各サイズの撮像管の作るイメージサイズが現在も基準として使われているためである．1/2インチのCCDの対角寸法が1/2インチではない．1/2インチCCDというのは，1/2インチの撮像管のイメージサイズと同じという意味で使われている（yama, 2002）．このようになったのは，撮像管からCCDへと移行した時に，光学系部品の規格を変更しなくて済み慣例が守れるためである．

35 mmのフィルム用の一眼レフカメラのレンズ

表1　レンズの焦点距離と画角の関係

焦点距離(mm)	14	24	28	50	90	135	200	300	400	500
高さ（°）	81.20	53.13	46.40	26.99	15.19	10.16	6.87	4.58	3.44	2.75
幅（°）	104.25	73.74	65.47	39.60	22.62	15.19	10.29	6.87	5.15	4.12
対角（°）	114.18	84.06	75.38	46.79	27.03	18.21	12.35	8.25	6.19	4.95

この表は，35 mm版フィルムとして計算した．35 mm版フィルムは，高さ24 mm，幅36 mm（35 mmよりやや広い）である．したがって対角の長さは43.26 mmとなる．ただし，フォーカス方式や被写体との距離，公差などによって多少画角が変わることがある．

表 2　CCD サイズとの換算

型	対角インチ	対角（mm)*	対角（mm)**	幅（mm）	高さ（mm）	換算率
2/3，1/1.5	0.6667	16.9333	11	8.8	6.6	3.93
1/2	0.5	12.7	8	6.4	4.8	5.41
1/3	0.3333	8.4667	6	4.8	3.6	7.21
1/4	0.25	6.35	4.12	3.6	2	10.51

*：対角のインチの値から計算した値．**：表示されている対角の長さ．

を利用できるデジタルカメラが普及しだした．しかし，CCD の幅が 35 mm 相当のものは最高級のデジタルカメラに限られ，CCD の方がフィルムサイズより小さい場合がほとんどである．デジタルカメラで一眼レフ用のレンズを用いると，CCD サイズによって，レンズ本来の焦点距離が変化する．その換算方法は，それぞれの画角が同じ，すなわち d/f が一定であることから求めることができる（岡本，2004）．上記の式(1)と(2)で用いた f と d との関係から求めることができる．

$$\frac{d_{35}}{f_{35}}=\frac{d_y}{f_y} \quad \cdots\cdots(3)$$

であるから，

$$f_{35}=\frac{d_{35}}{d_y \cdot f_y} \quad \cdots\cdots(4)$$

となる．ここで，添え字の 35 は 35 mm フィルム用のカメラのもので，y は目的のカメラの値を示す．

表 2 の換算率は，デジタルカメラから 35 mm フィルムへの換算値であるが，デジタルカメラで一眼レフ用のレンズを用いる場合は，逆数を掛ければ求められる．

2.3．絞りとシャッター速度

絞りとはレンズに入ってくる光量を調整するメカニズムである．絞り羽根と呼ばれる光をさえぎる羽根状の板がレンズに組み込まれている．絞りは，F と表記され数値として示される．そして絞りを一番開けた状態を，レンズの「開放絞り値（開放F値）」とも呼ばれ，レンズの明るさとみなされる．F値は，レンズの口径を焦点距離で割ったものである（Canon, 2002）．F値は 1，1.4，2，2.8，4，5.6，8，11，16，22 などである．数値が小さいほど（0 に近い），レンズが明るくなる．一般に F 2.0 よりも小さい数値だと，明るいレンズとされる．F値が，1 から 1.4 になると，光の容量は半分になる．カメラによって，F値は，1/2 や 1/4 などで変更できる．この値が一つ変わると露出が 1 段変わるという．

シャッターとは，フィルムカメラでは光が当たる（露光という）時間を調整するメカニズムで機械的なもの（メカニカル）と電子的なものがある．露光する時間をシャッター速度という．シャッター速度が 1 秒以下の時は，分数であらわされる．1 秒よりも露出が 1 段暗いのが 1/2 秒，さらに 1 段暗いのは 1/4 秒となっていく．

シャッター速度が早ければ，動く被写体でも静止しているように写り，遅ければ被写体が露光中に動いて写る．被写体が意図せずに動いた画像は，ぶれたものとなる．手ぶれしないシャッター速度の目安として，35 mm のフィルムカメラでは「1/焦点距離」秒といわれている．例えば，焦点距離が 35 mm のレンズなら 1/30 秒以上が手ぶれしないシャッター速度なる．しかし，シャッター速度を短くすると光量が減るので，十分に明るい状況でないと，暗い像となる．

このように絞りとシャッター速度を調整して，様々な撮影効果を得ることができる．現在では，撮影状態にあわせてカメラが適切なシャッター速度と絞り値を選ぶ機能をもったもの（オートとよばれることが多い）が多くなってきた．

オートで景観を撮影するときは，写真を撮る者は，焦点距離（つまり画角）と景観の配置具合（構図という）を選ぶことになる．

2.4．広角レンズと望遠レンズの効果

オートではなく，絞りとシャッター速度，そしてレンズの焦点距離の組み合わせを換えることによって，遠近感（写真では Perspective と呼ばれている）や被写界深度という視覚効果が生まれる．

写真における遠近感とは，遠近の距離感を二次元的な画面において生じることである．近くのものが大きく見え，遠くのものが小さく見えるという視覚的効果を表現することによって，遠近感が生まれる．しかし，肉眼とは違って，写真ではレンズの焦点距離によって，遠近感の現れ方が違ってくる（TAMRON, 2004）．

広角レンズを用いた写真では，近くにあるものはより大きく，遠くにあるものはより小さく写る．広角レンズでは肉眼で感じる以上に遠近感が生じる（「遠近感の誇張」と呼ばれる）．逆に，望遠レンズでは，遠くの被写体と近くの被写体との大きさに違いがあまりなくなるために，遠近感がなくなっていく（「距離感の圧縮」と呼ばれる）．

カメラでは，焦点が合って像が鮮明に見えている状態を「ピントが合う」と呼び，ピントが合っていないときを「ピンボケ」と呼ぶ．ピントの合っている範囲を「被写界深度」という（TAMRON, 2003）．ピントの合っている範囲の前方と後方（被写体からカメラ寄りのピントが合ったように見える範囲を前方被写界深度，被写体から無限遠寄りのピントが合ったように見える範囲を後方被写界深度という）が，ピンボケとなる．ピントが合う範囲を「許容錯乱円」と呼ぶ．

ピントが合っている範囲が広い場合を被写界深度が「深い」，狭い場合を被写界深度が「浅い」という．被写体深度は，絞りが開いているほど（F値が小さいほど）浅く，絞るほど（F値が大きいほど）深くなる．レンズの絞りを絞れば，許容錯乱円に入る範囲が大きくなり，開けば小さくなる．

また，被写体深度は，広角レンズほど深く，望遠レンズほど浅くなるという特徴がある．言い換えると，広角レンズでは，ピントがあっている範囲が広く，被写界深度が深くなる．

遠近感と被写界深度は，レンズの絞りと焦点距離によって変化する（周防，2001）．それを撮影者が意図的に用いることによって，様々な撮影効果を生むことが可能となる．

以上のようなことを考慮して，撮影に望むことになるのだが，自然景観においては，目標物が広範囲になる場合が生じる．そのような場合は，遠近感は少々犠牲にしてもいいから，被写体深度は可能な限り深いほうが良くなる．絞り込んでいくと，やがて後方被写界深度が許容錯乱円を越えと場合が生じる．このような状態になると，前方被写界深度のかなり近く，後方被写界深度は無限遠近くまで広がる．このような状態をパンフォーカスという．

広角レンズを使い，レンズの絞りを絞り込んで，パンフォーカスにして写せば，自然景観の広範囲の撮影が可能となる．これが，有効な方法である．

2.5．解像度

解像度とは，単位面積あたりの画素数を意味する．しかし，表示媒体によってその基準が違っているので混乱を招くことがある．デジタルカメラでは，上述したように CCD の総画素数によって解像度が示されている．

印刷業では解像度を表すのに「スクリーン線数」とか，単に「線数」という単位を用いられる．これは 1 インチ当りに何本の線が引けるかということを示すものである．カラー印刷だと通常 175 線，モノクロ印刷は 133 線となる．

コンピュータのディスプレイの解像度は，横幅と高さのピクセル（pixel）数によって定義される．横幅が 640 ピクセルで高さが 480 ピクセルのイメージは，640×480 で，30 万 7200 ピクセルの画素が含まれている．画面の解像度が高ければ，より多くのピクセル数を持つことになる．ただし，一般的なブラウン管や液晶ディスプレイの表示能力は，72 dpi あるいは 96 dpi などの低解像度なので，高解像度の画像を表示しようとすると，画面をはみ出る大きなサイズとなっていく．ソフトによっては，間引いた状態で全画像を表示されることがおこなわれる．

代表的な出力装置であるプリンターでは，解像度の表示は，dpi（dot per inch）で示される．dpi とは，１インチ（約 2.5 cm）当りの長さに，いくつの画素あるかを示している．コンピュータの画面や画像の表示面積では，解像度が画素数で表される．ディスプレイの画像と解像度と出力装置（通常は，コンピュータの画面か印刷したドキュメント）の解像度が一致しているのが理想的であるが，一般的なインクジェットプリンタやレーザープリンタの解像度が高く，ディスプレイの 72 dpi あるいは 96 dpi に対して，プリンターは 300 dip 以上の解像度を持つ．

したがって，画像の出力形式によって，必要となる解像度は変わってくる．しかし，自然景観をできるだけ詳細に記録したいのであれば，画素数の多い状態での記録が望ましい．

パノラマには，後述のようにさまざまな撮影方式，保存フォーマット形式，表示形式がある．パノラマの様式ごとに解像度の表示がさまざまであると比較が難しくなる．そのために，単位角度あたりのピクセル数を角解像度（Angular Pixel Density）として，焦点距離で各種のパノラマごとに補正したものが用いられる．このようなものをパノラマ解像度（Panoramic Resolution）と呼ばれる（Turkowski, 1999; 2004）．表 3 では，本論文で使用する広角画像や魚眼レンズに画像に対する計算式を示した．

画角は広角レンズにすれば広範囲を撮影できるが，角解像度は減少する．角解像度を上げていくには，高解像度のデジタルカメラを用いる方法，画角を狭くする方法がある．

高解像度のデジタルカメラの画素の集積度は日進月歩で上がっている．現状では，費用は必要だが，一番単純な角解像度を上げる方法は，高解像度のデジタルカメラを使用することだといえる．しかし，一研究者が実施するには費用がかかりすぎる用法には問題があるし，現状のデジタルカメラでの最高の解像度は 1700 万画素程度である．費用対解像度を考えるのであれば，画角を狭く抑え，多数連結することで，角解像度を上げる方法が，利用できる機材でおこなえる一番有効な方法であるといえる．

３．パノラマ撮影

3.1．パノラマの意味

パノラマ（panorama）は，現在では，広い範囲の景観や広々とした眺めという意味で使われている．しかし，過去には様々な視覚効果を起こす装置や絵画などとして使われた．

パノラマ（panorama）は，ともともギリシア語の「すべて」という意味の pan と，「見える」という意味の horama をあわせて作られた 18 世紀後期の造語である．

透視図法を極度に誇張して適用することによって，錯視効果を高めるバロック劇の舞台装置や芝居絵がその発祥である．その後，教会の円形壁画（cyclorama）や天井画として，パノラマ技法が利用され，不思議な空間（天国など）への参籠の体験を呼び起こすような視覚効果として利用された．

表 3　パノラマ解像度の計算算式

画像	変数	解像度 (pixels/degree)
広角	s：ピクセル数 f：焦点距離（mm）	$f \cdot \frac{(s-1)}{24} \cdot \frac{\pi}{180}$
球形	c：円周（mm）	$\frac{(c)}{360}$
立方体	w：面のピクセル数	$\frac{(w-1) \cdot \pi}{360}$
円形 180°魚眼レンズ	d：直径（mm）	$\frac{(d-1)}{180}$

広角と魚眼レンズの画像は 3 ： 2 の画角を持つものとして計算している．式は，35 mm フィルム（実際のフレームサイズは 36×24 mm）として計算している．Turkowski（2004）より．

パノラマによる風景を，円形絵画として人工的に作成して，照明や可動装置を利用して，実物そっくりに見せる近代の見世物として展開された（種村，1998）．画家の R. Barker は，1788 年にエジンバラ，1794 年にはロンドンでパノラマの興行をした．パノラマ興行は，その後パリからベルリン，アメリカにも広がった．

現代，このような見世物としてのパノラマは廃れてしまったが，ジオラマ（diorama）は，博物館などの展示手法として今も利用されている．ジオラマとは，自然景観を再現した中に，剝製や模型を配置して，立体的に見せるものである．壁面とその前面の剝製や模型のある部分を切れ目なく再現されているために，狭い展示ケースの中でも，広い景観を見ているような視覚効果をもたらすものである．ジオラマを効果的見せる工夫をしていた L. J. M. Daguerre は，1839 年に銀板写真（ダゲレオタイプ）を発明して，今日の写真の基礎を築いた（友田，1998）．

パノラマとして景観を撮影する専用のパノラマカメラ（panoramic camera）がある．パノラマカメラとは，固定スリットと走行するフィルム，あるいは走査スリットと固定フィルムの組み合わせで撮影するものである．回転するレンズと回転するスリットによって円形に配置されたフィルム上にきわめて大画角の映像をゆがみなく撮影でき，360 度の画角を撮影できるものもある（小倉，1998）．

現在の写真撮影でいうパノラマとは，広い範囲（広画角）を撮影するもので，その画角が必ずしも定義されていない．単に 35 mm フィルムの縦横比と比べて横への広がりが大きい場合をパノラマと呼ぶことがある．パノラマの定義は定かではない．

整理するとパノラマには，

・横長のパノラマ
・連結した画像によるパノラマ（360 度連結したパノラマも含む）
・球体パノラマ画像（フルパノラマとも呼ばれる）

など多様なものがある．ここで列記したものは，下になるほど，自然景観の記録範囲は広がる．その他にも上述のようにさまざまな特殊装置によるパノラマ撮影もされている．一番身近なものしては，オムニマックス（Omnimax）によるパノラマ画像であろう（Greene, 1986）．

以下では，自然景観の記録におけるそれぞれの特徴を示し，著者が実際に行っている利用方法を紹介する．

3.2．横長のパノラマ

横長のパノラマとは，縦と横の比が普通の 35 mm フィルムより縦を短くしたものである．35 mm フィルムの横の幅はそのままで，天地あるいはどちらかを削除して示すものである．いわゆるトリミング（trimming）によって，横長のパノラマを作成していくものである．フィルムであれば，微粒子フィルム（ISO の値の小さいもの）を利用することによって，焼付け時にトリミングをすれば，簡単に横長のパノラマ画像は作成できる．

一時期，パノラマ撮影ができるカメラとして発売され，焼付け時に横長サイズのプリントを作成して提供されるサービスがあった．しかし，現在ではあまり利用している人は見かけなくなった．

広域に広がる自然景観を記録するには，広角度のレンズを使用して撮影する方法がある．超広角のレンズを使用して撮影し，不要な天地をトリミングして，パノラマ画像を作成する方法である．

撮影時に歪みの少ないレンズを使えば，手軽に，横長のパノラマ画像の作成は可能である．しかし，本論文での目的として考えている広域の自然景観の記録には，この方法が使えない．また横長のパノラマには 2 つの問題点がある．解像度の低下と画像の歪みである．

撮影したものを単にトリミングをすると，もともとの持っていた解像度を下げていることになる．これはより詳細に記録したいのであれば，トリミングする必要がないことになる．また，広角度の撮影は歪みが多く，歪みの少ない標準レンズを使うと広域の自然景観を撮影することができない．このような問題を解決するには，下記に述べるように歪みの少ない画角の画像をいくつも連結することで解決でき

る．

3.3．連結した画像によるパノラマ

自然景観の忠実な再現をするには，歪みの少ない標準レンズでの撮影画像を連続的おこない，それを合成していく撮影方法がある．単純に画像を張り合わせたのでは，その接合部で不自然さが生じる．不自然さとは，それぞれの画像において撮影条件の変化による露出のシャッター速度の違いによる画像の違い，歪みによるずれが生じるためである．また，標準レンズであっても，端の方はある程度の歪みが生じることがあり，接合部ででは継ぎはぎをした箇所が境界線として見えてしまう．

一般の標準レンズ（50 mm 程度）での撮影をすると，360 度の景観を記録する場合，画像を合成するには一枚の画像のうち 3 分の 1 程度の重複をさせながら撮影することになる．したがって，横方向 40 度の画角を持つ 50 mm 標準レンズで，360 度の全周を撮影しようとすると，10 枚以上の撮影をしなければならない．しかし，三脚を使って，正確に回転角度を見ながら撮影すれば，比較的楽に撮影は可能となる．

ただし，歪みや接合の不自然さを解消するためには，コンピュータ上で合成するという方法を用いなければならない．デジタルカメラで撮影した画像をコンピュータ上で合成加工する方法については後述する．

歪みを補正できるのであれば，超広角度のレンズを用いて接合部を少なくして，あるいは一枚の画像で補正をすることによって，より自然に近い画像を作成することが可能である．

超広角度のレンズとしては，対角の画角（最大画角）が 180 度のレンズ（焦点距離 12 mm のものがある）やレンズ前面の画角が全方向に対して 180 度以上の魚眼レンズ（焦点距離 7 mm，5.6 mm などのものがある）などがあるが，このような超広角度レンズによる画像は，端になるほど歪みは大きくなる．したがって自然景観などの実物を忠実に再現したいのであれば，補正は不可欠となる．

3.4．球体パノラマ画像

球体パノラマとは，自然景観を天地四方すべての方向の 360 度分の球体とみなして記録し，再現するものである．もし，このような方法が手軽に利用できるのであれば，非常に有望な自然記録の方法となるであろう．

球体パノラマを撮影するには，地平線方向はもとより天地も撮影をしておかなくてはならない．もし標準レンズでこのような撮影をしようとすると，多くの撮影枚数を必要とする．コンピュータを用いて合成するにしても，正確に重複する撮影をおこなわなくてはならないし，その撮影は複雑にならざるをえない．したがって標準レンズによる撮影では，実用上問題がある．

上述の画角 180 度の魚眼レンズを利用すれば，前後 2 枚の撮影をして，コンピュータで加工をすれば，撮影自体は比較的楽であり，実用的な手法となる．これについては，後述する．

4．画像連結によるパノラマの作成

4.1．撮影

画像を連結してパノラマを作成するために，著者がおこなっているデジタルカメラとコンピュータのソフトで合成する方法を中心に紹介していく．

複数の画像を撮影して合成するには，いくつかの注意点，あるいはコツがある．撮影時に，

- できるだけ絞りを開放して，ピントを広範囲で合うパンフォーカスにすること
- 画像の連結をするためには絞り，シャッター速度，ピントを固定すること
- 各画像が水平に撮影され，上下にもずれが少ないこと
- 隣り合う画像の何割かが重なること

などがあげられる．このようなノウハウは，何度も撮影することで習得することしかないようだ．

ただしカメラによっては，パノラマ合成をするための特別に設定された撮影モードを持つものもあり，それを利用する方法もある．著者は Nikon Coolpix 4500（製造中止）を使用しているが，この

デジタルカメラには，パノラマのモードがあり，ホワイトバランスを一定にし，画像の重なりを簡単に確認できるように前に撮影した画像がカメラのビュアー内に3分の1残された状態で次の撮影ができる．直前の撮影画像を参照しながら重なるように撮影していけば，適切なパノラマ撮影ができる．もし，パノラマ専用に撮影するのであれば，このようなデジタルカメラの選択もあるであろう．

4.2．加工手順

上述のように撮影された画像を，単純に結合すると，結合部で歪みが生じる．あるいは三脚を使用しないで手持ちで撮影すると，画像ごとに上下にズレが生じる．時には水平面さえずれていることがある．そのようなズレや歪みを合成時には補正しなければならない．

まずカメラを横位置にして撮影した広い画角の自然景観の画像例を示す．絞り，シャッター速度，ピントを固定して，手持ちで撮影した3枚の画像（図3A 1～A 3）を並べると，図3B（四角い枠がそれぞれの写真の範囲）のようになる．一見するとこれでいいように見えるが，よく見ると歪みと色，ホワイトバランスの違いが境界部で認められる．それを，コンピュータのソフトウェアで画像を補正していくと，歪みと境界線の接合部が消されて，図3Cのようになる．このような補正はステッチ（stitch）と呼ばれる．ステッチ後の画像をみると，画像全体として手持ち撮影による水平のズレ補正したために，画像の枠が歪んだものとなっている．必要であれば，上下を水平にトリミングすれば図3Dのような，横長で解像度の高い画像が合成できる．

撮影環境として，近い景観を広範囲に保存したい場合，横の広がりだけでなく，縦方向の広がりの画像も確保する必要がある．実際のカメラでは超広角レンズが必要となり，歪みなく撮りようのない景観でも，カメラを縦位置にして上下の画角を確保しながら，連続撮影していくことが可能である．図4A 1～A 4がその例である．4つの縦位置での撮影画像を，連結して（図4B），ステッチしていけば，高解像度でのパノラマ画像（図4C）の合成が可能となる．

枚数の多い360度全周の撮影画像も同様に合成は可能である．図5A 1～A 12で示したのは，12枚の画像を用いて360度のパノラマ撮影を手持ち撮影でおこなったものである．手持ち撮影のために，画像の重なりが不規則になっており，水平にも歪みが生じている（図5B）が，ステッチは可能で，高解像度での連続記録が可能である（図5C）．必要であればトリミングをすれば，横長のパノラマ画像となる．

5．球体パノラマの作成

5.1．魚眼レンズの特徴

魚眼レンズは，特殊なものであるが，自然景観の記録には有効なものである．魚眼レンズの特徴は，焦点距離が非常に近いところ（時には0 mm）から無限遠まで焦点が合うレンズで，レンズの向いている方向に180度の画角の撮影を可能とするものである．フィルムあるいはCCDには，円形の画像として記録される．

180度の半球に相当する球面を平面に投影するために，実際には直線であるものも歪みが生じて変形していくことになる．その歪みは，周辺部に行くにしたがって大きくなる．10 mmメッシュの200×200 mmの画像（図6A）を，撮影距離を離していくことで，その効果を見ることができる．図6B 1～B 3は，レンズの先端から画像までの距離を，それぞれ20，30，130 mmと離して撮影したものである．被写体を中心にして離していくと（図6B 3），中央部で小さく投影されている．中央部では歪みが比較的少ないから，直線のメッシュらしく見える．一方，近くで撮影したものは，被写体が周辺にまで広がり，周辺では直線の歪みは大きくなることがわかる（図6B 1）．しかし，魚眼レンズでの撮影は，いずれにしても，補正をしなければならない．

図6B 1を見ると，中央付近のメッシュに比べて，周辺のメッシュは小さくなっていることがわかる．これは，円形画像の中心から離れるにしたがって，単位画角当りの解像度，つまり角解像度が落ちてい

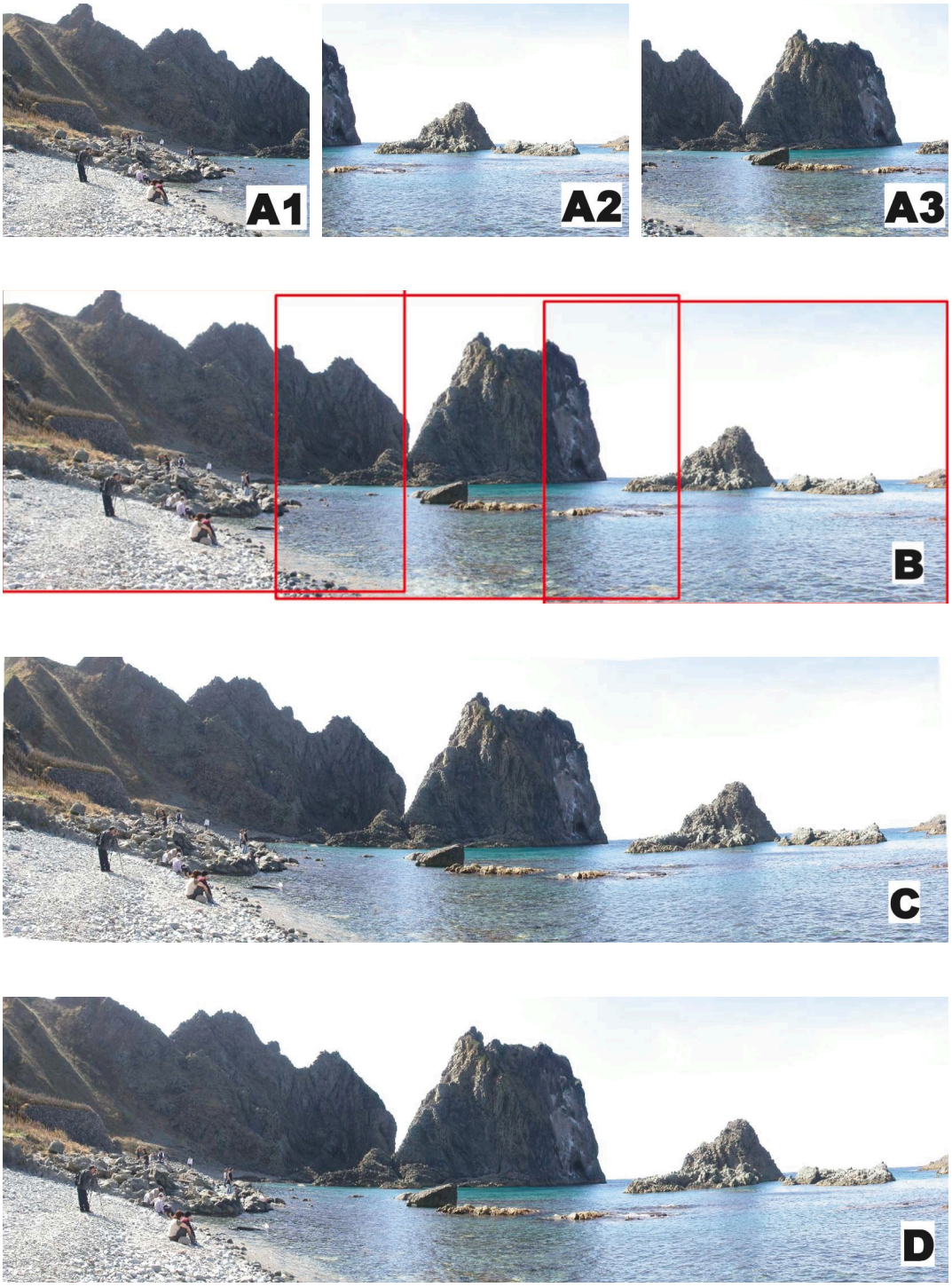

図３　カメラの横位置に撮影による画像処理の例

Ａ１〜Ａ３：カメラを手持ちで撮影した３枚の元画像．Ｂ：Ａの画像を連続するように並べたもので枠は元の画像の範囲．Ｃ：Ｂの画像をステッチした後のもの．Ｄ：Ｃの画像を四角くトリミングした完成画像．

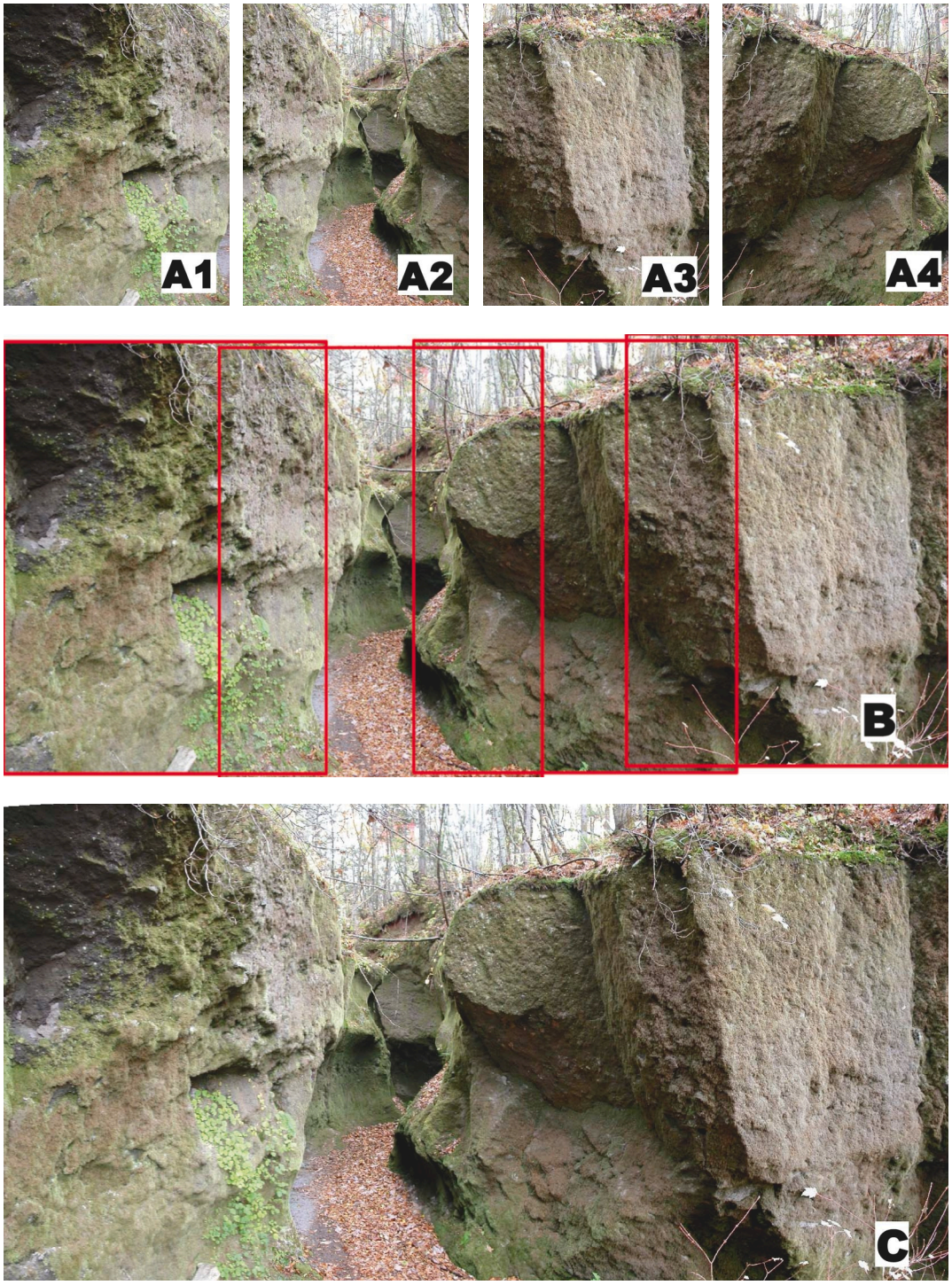

図 4　カメラの縦位置に撮影による画像処理の例

Ａ1〜Ａ4：カメラを手持ちで撮影した 4 枚の元画像．Ｂ：Ａの画像を連続するように並べたもので枠は元の画像の範囲．Ｃ：Ｂの画像をステッチし，トリミングした完成画像．

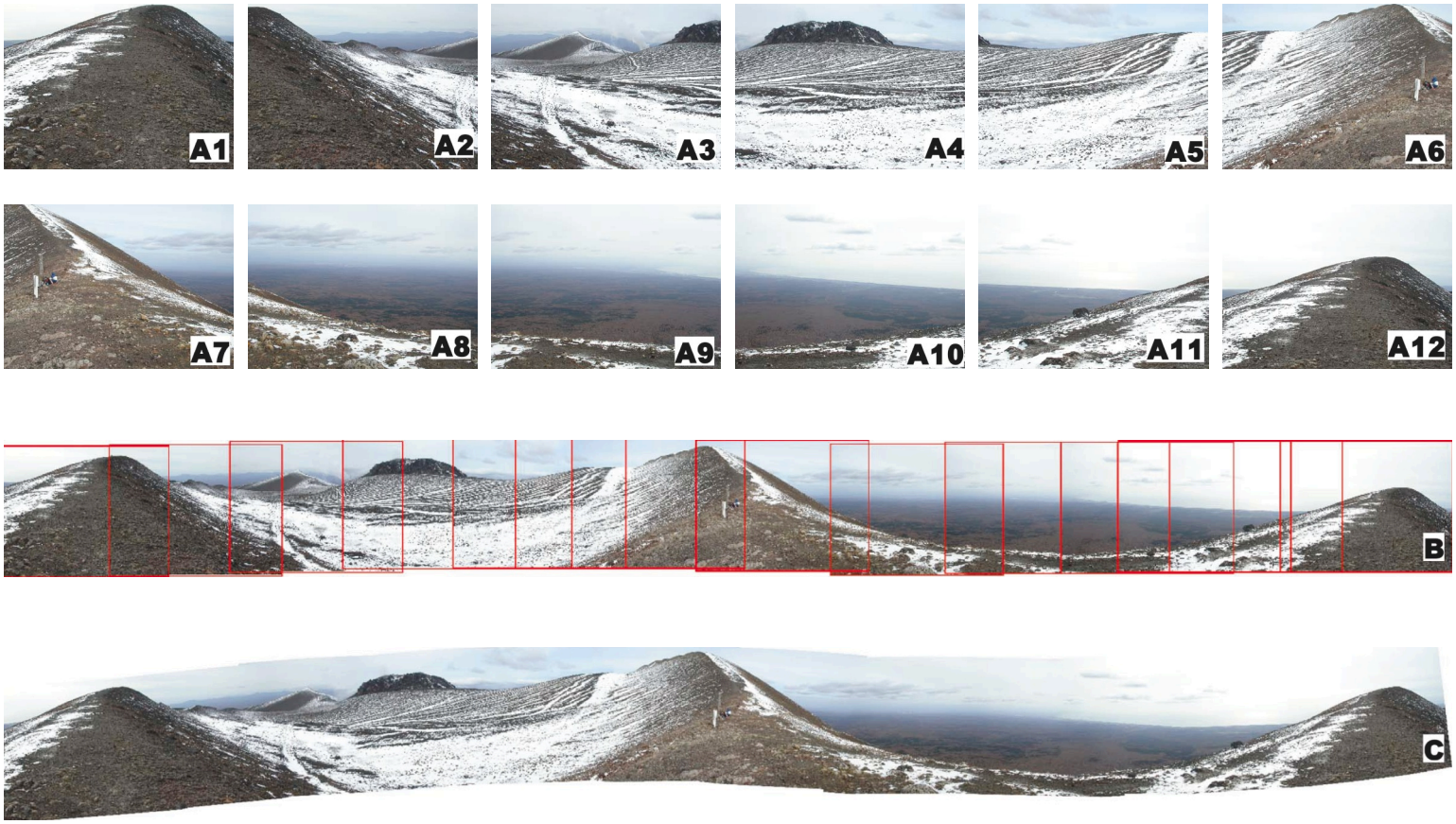

図 5　360 度全周パノラマ画像の例

A 1〜A 12：手持ち撮影による 12 枚の元画像．B：A の画像を連続するように並べたもので枠は元の画像の範囲．C：B の画像をステッチした完成画像．

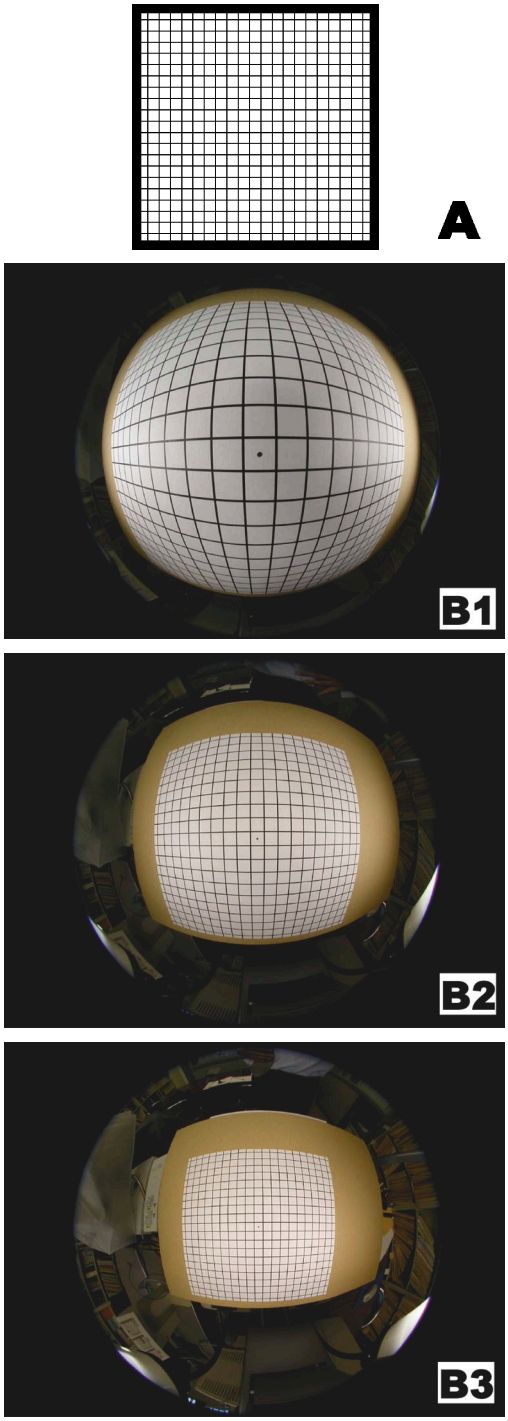

図 6　魚眼レンズの撮影位置による歪みの変化

A：200×200 mm の大きさの 10 mm メッシュの図. B1～B3：魚眼レンズの先端からメッシュ図まで，それぞれ 20 mm（B 1），70 mm（B 2），130 mm（B 3）の距離で撮影.

ることを意味する．この欠点を補うためには，魚眼レンズによる撮影を前後の 2 方向だけの撮影でなく，3 個あるいはそれ以上の撮影をおこない，解像度をあげることをおこなわなければならない．

しかし，多数の魚眼レンズにより画像をステッチするためには，ソフトウェアとして優れたアルゴニズムを持つものや，コンピュータの処理能力があるものを用いなければならなくなる．もちろん，解像度が上がれば，それだけ処理時間が必要となる．

さらに魚眼レンズの特性として，ノダール点（nodal point）に注意が必要である．ノダール点とは，魚眼レンズの結像点を意味する．180 度の画角を持つ魚眼レンズであれば，ノダール点を中心に回転をすれば，原理的には，前後の画像をステッチしなくても結合できることになる．実際には，結合部分の位置の微調整や色，ホワイトバランスなどの微調整をしなければ，結合部分が目立ったものとなる．

ノダール点での回転ができないときには，多数の重複撮影の後，画像調整をかなりおこなった後，合成処理をしなければならなくなる．それでは，魚眼レンズ使用の簡便さという有利性が発揮できない．

有利性を保つには，ノダール点で回転して撮影をしなければならない．三脚の上に特殊な回転軸をもつヘッドを装着することで可能となる．魚眼レンズによってノダール点は決まってくるので，その回転ヘッド装置は魚眼レンズとカメラ本体との組み合わせによって固有の値に設定された特殊なものとなる．しかし，いくつかの海外メーカが，カメラと魚眼レンズの組み合わせごとに専用回転ヘッドを製作販売しているので利用可能である．

5.2．魚眼レンズによる撮影と加工

著者は，自然景観の記録として，使用しているソフトウエアの仕様から，魚眼レンズの一方向，前後 2 方向，3 方向の撮影をおこなっているが，ここでは，一方向と前後 2 方向の撮影の実際について紹介する．3 方向の撮影は，前後 2 方向を 180 度間隔で撮るのに対して，120 度で 3 方向で撮るだけの違いで，撮影手法や加工には差がない．ただし，ステッチの

ための事前の微調整や計算時間はより多くかかることになる．

１枚の魚眼レンズによる撮影は簡単である．ただし，自分の体の一部が写りこまないこと，対象物に露出があっていること，太陽光によるハレーションが最小限であること，などに注意すれば，簡単に撮影できる．

複数枚の撮影では，三脚の使用と特殊回転ヘッドの使用は前提となる．画像連結パノラマトと同様に，魚眼レンズによる画像の連結をするためには，絞り，シャッター速度，パンフォーカスでピントを固定すること，各画像が水平に撮影され，上下にもずれが少ないこと，ノダール点で回転した撮影をおこなうことが，重要となる．

撮影した画像を，微調整した後，２つの画像をステッチする．閲覧方法によって，画像のステッチ方法が変わってくる．現在パノラマの方式としては，大きく分けて，球形パノラマ（spherical panorama）と立方体パノラマ（cubic panorama）の２つの方法がある．

撮影した対象物は，球体空間を平面に円形に投影したものである（図７Ａ1，Ａ2）．球形パノラマとは，球体空間を，180 度の垂直方向と 360 度の水平方向の平面画像をとしてステッチしていくものである．基本となる画像は，一枚の四角いパノラマ画像となる（図７C）．

この画像を閲覧ソフトで球体空間として再現して表示するものである．閲覧時には画像境界は境目がないようにステッチされている．しかし，基本画像の性格上，画像の角解像度は，場所ごとで大きな違いが生じることになる．例えば，撮影の元画像と比べて，天地の画像の角解像度が一番小さく，水平の中央部の画像の角解像度が一番大きくなっている．これは，もし興味の中心が，天地あるいは円形画像の境界部に多くあると，そこの角解像度が一番大きくなって欲しいが，角解像度の劣化がおこっているため，一番解像度の低い場所となる．

一方，立方体パノラマとは，球体空間を立方体の６つの面に投影してステッチするもので，それぞれの面の境目をないように分割したものである．球体を天地２枚と，前後左右の４枚がそれぞれ正方形の画像に投影しているために，その画像を閲覧時に接合して見せていくことになる（図７Ｂ1）．基本画像は縦に並んだ一列の画像として保存されている（図７Ｂ2）．立方体パノラマは，一方向の画像内でみると，中心部の角解像度が一番大きく，周辺部に行くにしたがって小さくなっていく．しかし，球形パノラマにおける角解像度のムラと比べると，立方体パノラマは一枚の画角を小さく分割しているため，ムラは小さくなっている．

どちらのステッチの方法を選ぶかは，パノラマの閲覧方式に依存する．

一枚の魚眼レンズによる画像から再現していく方式も，上述と同等の考え方ができる．ただし，立方体パノラマは中心部分と上下左右の画像が何割かがくっついたものになるために，処理が難しくなる．そのため，球形パノラマの半球としてステッチすることにする（図８）．そして閲覧方式は Real time VR パノラマ形式や PTViewer パノラマ形式となる．

5.3．パノラマの閲覧形式

パノラマ画像を，印刷ではなく，デジタル画像のままコンピュータのブラウザーで閲覧する方法について考えていく．パノラマ画像を閲覧するためのビュアーの多くは，インターネット用のブラウザーに，プラグインや java applet によって閲覧できる形式にしたものである．それによって，閲覧者が操作することよって，自由に画像を動かし四方天地を自由に見渡すことができるし，ズームインやズームアウトなども自由にできる．高解像の画像として保存されていれば，ディスプレイ上では，パソコンの能力とアプリケーションと処理の能力の範囲であれば，かなりのズームインに耐える画像を提供できる．また，閲覧ソフトによっては，画像を動画のように画像を回転させることもできる．

球形パノラマとして，Real time VR パノラマや PTViewer パノラマと呼ばれるものなどがある．

Real time VR は，MGI ソフトウェア社が開発し

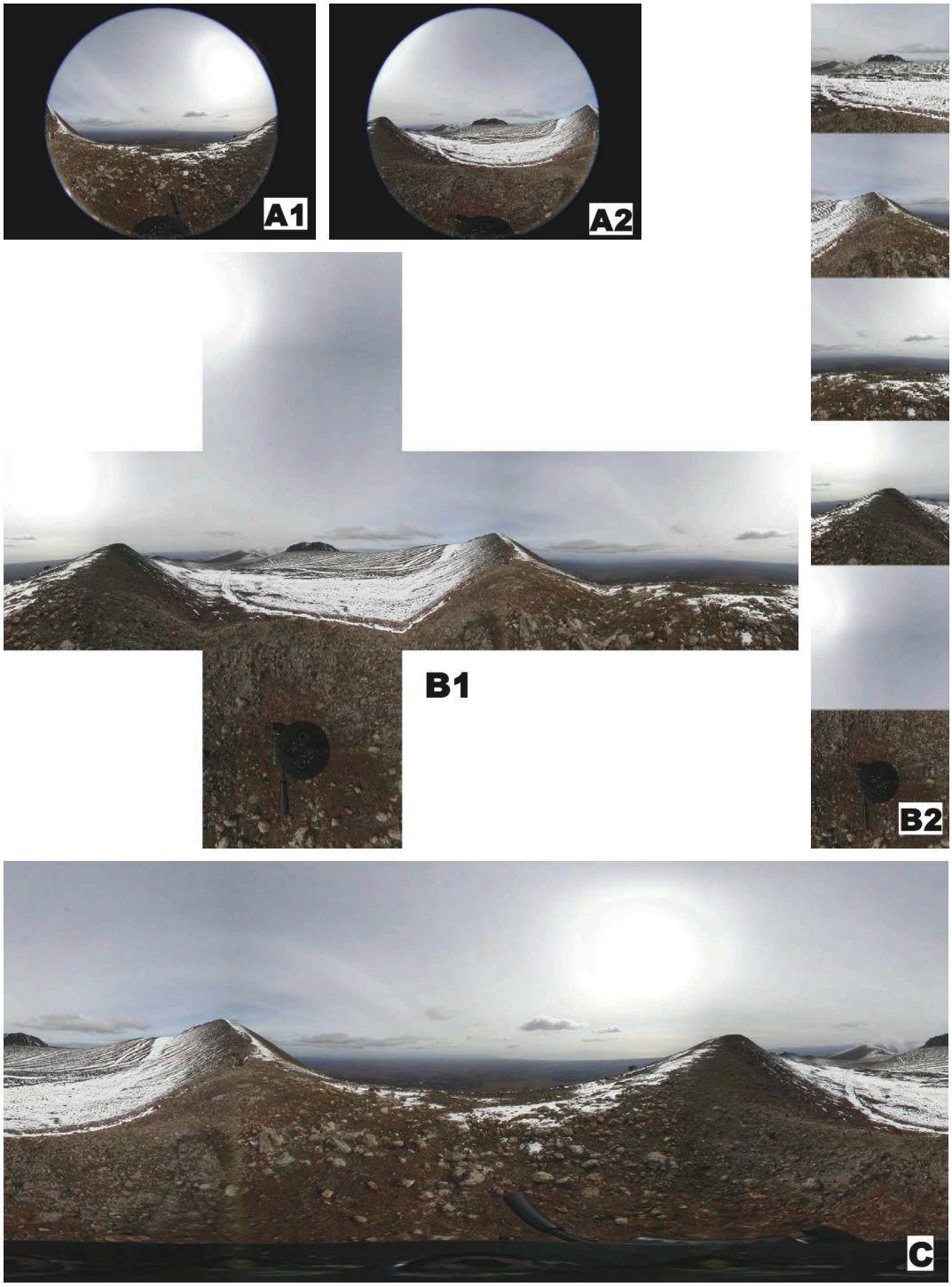

図 7　魚眼レンズによる 2 方向の球体パノラマ画像の例

Ａ1，Ａ2：魚眼レンズによる前後の撮影画像．Ｂ1：立方体パノラマの 6 枚の画像を展開図として配置したもの．Ｂ2：立方体パノラマの保存形式による画像．Ｃ：球形パノラマの保存形式による画像．

図 8　魚眼レンズによる一方向のパノラマ画像の例
A，B，Cのそれぞれの 1 が元画像，2 がステッチ後の画像.

た java applet を用いたもので，ビュアーはフリーソフトである．Real time VR のパノラマは，html ファイルの中から，ivr 形式（.ivr の拡張子を持つ）のファイルと JPG 画像ファイルを呼び出して表示するものである．

PTViewer は，html ファイルに埋め込まれている java applet で JPG 画像ファイルを呼び出して表示するものである．PTViewer はドイツの数学者 H. Dersch によって開発された GPL（General Public License）のもとで自由に利用できるものである．GPL とは，フリーソフトウェアのライセンスの形式のことで，ソフトウェアとそれを使用するユーザーに，使用，複製，変更，再頒布などの自由を与えることを目的としているものである．

立方体パノラマとして，QTVR パノラマや VRML パノラマと呼ばれるものなどがある．

QTVR とは，QuickTime Virtual Reality の略で，アップルコンピュータ社が開発したパノラマ用のフォーマットである．この QTVR パノラマを見るためには，QuickTime プラグインをインストールする必要がある．QTVR パノラマは，html ファイルが MOV 形式（.mov の拡張子を持つ）のファイルを読み込んで表示するものである．MOV ファイルは，QuickTime player があれば，単独でも見ることができるので，便利である．

VRML とは Virtual Reality Modeling Language の略である．VRML によるパノラマは，html ファイルが wrl 形式（.wrl の拡張子を持つ）のファイルと 6 つの JPG 画像ファイルを用いて表示するものである．VRML インターネットでの universal 3D ファイル形式と呼ばれているものである．VRML を表示するためのプラグインはたくさんある．

著者は，閲覧形式の手軽さと，多様なコンピュータで閲覧可能であることから，MOV 形式を選択している．しかし，これらの違いは，ステッチ用のソフトウェアが処理をするので，閲覧方式を考えて，好みに合わせて利用すればよい．

ただし，ソフトウェアによっては，ステッチ 1 回に対して課金する商用ソフト，いくらでもステッチできる商用ソフト，完全にフリーのソフトまで様々なものがある．それぞれの個性があるので，好みに合わせて選択することになる．

6．さいごに

広範囲に及ぶ自然景観の記録には，高解像度のデジタルカメラによって撮影された連続画像から，コンピュータの処理によってパノラマに合成する方法が有効である．

従来は銀板フィルムの解像度や再現性が勝っていた．現状でも，大判フィルムが最高のものであるが，市民が機材をそろえることを考えると，普及しているデジタルカメラ（400 万画素クラス）でも充分実用に耐える段階に達してきた．

また，本稿で示したように，パノラマなどの特殊加工をするのであれば，デジタルカメラでいくつかの注意をして撮影すれば，フィルムカメラの撮影より，手軽に，そして高解像度の画像として加工することが可能ってなってきた．

今後，デジタルカメラ，コンピュータ，ステッチソフトや閲覧ソフトの進歩によって，ますますパノラマ撮影は発展していく可能性がある．したがって，できるだけ多数のデジタル画像として，なくなりつつある自然や景観を記録しておくことが重要である．そして現状ではネットワークやコンピュータのハード的限界によって解像度が制限されるかもしれないが，将来的にはより高解像度の閲覧が可能になっていくであろう．

参考文献

Canon, (2002).『EF Lens カタログ』

Greene, N. (1986). Environment Mapping and Other Applications of World Projections, IEEE Computer Graphics and Applications, November vol. 6, no. 11, pp. 21-29.

徐　剛（2001）.『写真から作る 3 次元 CG』. 近代科学社

小倉磐夫(1998).「パノラマカメラ」.『CD-ROM 世界大百科事典　第2版』
岡本　剛 (2004). http://cmehappy.fantastic-camera.com/articles/angleofview.html
周防克弥(2001).「絞りとシャッター速度」http://review.ascii24.com/db/review/ce/digicam/2001/10/12/630362-000.html
種村季弘, (1998).「パノラマ」.『CD-ROM 世界大百科事典　第2版』
TAMRON (2003).『レンズ総合カタログ』
TAMRON (2004).『写真講座』http://www.tamron.co.jp/photograph/lecture/index01~1.html
友田渦忠, (1998).「ダゲール」.『CD-ROM 世界大百科事典　第2版』
Turkowski K., (1999). Making environment maps from fisheye photographs (Using fish eye images in an Ipix-free manner), http://www.worldserver.com/turk/quicktimevr/fisheye.html
Turkowski K., (2004). Panoramic resolution, http://www.worldserver.com/turk/quicktimevr/panores.html
yama, (2002).『「CCD サイズ」の真実』http://www.pit-japan.com/ws30/ccd~size.html

Record of Natural Circumstances and Presentation Method Using by Panorama Image

by

Yoshiyuki KOIDE

Abstract:

The outline of wide-spread natural circumstance using panorama images is represented in this paper. There are usefully for continuous images and fish-eye images among various panorama methods. I reviewed the photographic recording, image stitching, presenting methods.

Keywords: record of natural circumstances, spherical panorama, cubic panorama, presentation method, camera