JNC TJ5420 2004-001

幌延地域におけるリニアメント調査

（「核燃料サイクル開発機構」契約業務報告書）

2004 年 3 月

日鉱探開株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184　茨城県那珂郡東海村村松４番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部　技術協力課
電話：029-282-1122（代表）
ファックス： 029-282-7980
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

Ⓒ 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2004

［資料番号］　JNC　TJ5420 2004-001

［発行年月］　2004 年 3 月

幌延地域におけるリニアメント調査

（「核燃料サイクル開発機構」契約業務報告書）

三箇　智二※

要　旨

幌延深地層研究計画における地質環境の長期安定性に関する研究が実施されている。本件は，その一環として，幌延町を含む地域の断裂系を把握するためリニアメント調査を実施した。

本件では，判読されるリニアメントの地形特徴に注目し，DEM から地形特徴量を算出することでリニアメントを自動的に検出することを目的とする。DEM によるリニアメント自動抽出は明確な定義づけによることが特徴であるが，地形特徴の認識や連結には検索距離や 1 つの線として認識させる際の振れ幅など，様々なパラメータを利用する。本件ではこれらパラメータを変更してリニアメント抽出を行った。また，地域の構造特性を数量化し，地形特徴間の連結距離を変更することで大局的な構造を反映させるものとした。判読結果との比較から抽出結果が良好となるパラメータの検討を行った結果，リニアメントの自動抽出には線素の連続性や構成比が重要であることが明らかとなった。

北進地域においてリニアメント判読結果と自動抽出結果の比較を行った。その結果，推定位置は異なるが方位特性・密度分布は類似していることを明らかにした。特に，大曲断層東側に分布する稚内層および声問層下部では NE-SW～ENE-WSW 方向のリニアメントが卓越し，その多くは北傾斜を示す結果を得た。

本報告書は日鉱探開発株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。
機構担当課室：幌延深地層研究センター　深地層研究グループ
［※日鉱探開株式会社］

［資料番号］ JNC TJ5420 2004-0001

［発行年月］ March,2004

A Study of Lineaments in the Horonobe Area

(「Japan Nuclear Cycle Development Insititute」
Doccument Prepared by Other Organaization, Based on the Trust Contract)

Tomoji Sanga※

Abstract

Crustal deformation until the present in the Northern Hokkaido including Horonobe Town, concomitant changes of geological environments and arising earthquake have been investigated as the Horonobe underground research laboratory project. This lineament study was performed to elucidate fracture systems in an area including Horonobe Town as a part of these projects.

The object of this study is to develop a method to detect lineaments automatically through statistic features calculated from DEM. This automatic detection algorithm of lineaments is characterized by clear definition of lineaments. In this algorithm some parameters as search area to detect and connect same geomorphological features, and permissible limit of deviation to link as a line are indispensable. In this study various parameters are examined as lineaments detected by this method coincide with ones extracted by photo interpretation. As a result of examining parameters to which an extraction result from comparison with interpretation result, it became clear that the continuity and total length of segments are important for automatic extraction.

Results of interpretation and automatically extraction of lineament were compared in the Hokushin area. Consequently, it was clearly shown that the directional characteristics and distribution density of lineaments are similar although estimated positions are different. Especially, NE-SW to ENE-WSW lineaments dominat in the Wakkanai and Koetoi formation distributed to the east of Omagari fault. Most of these lineaments dip to north.

This work was performed by Nikko Exploration and Development Co., Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.
JNC Liaison: Horonobe Underground Resarch Center
Geotechnical Science and Engineering Group
［※Nikko Exploration and Development Co., Ltd.］

目　　次

要旨 ---------- i
Abstract ---------- ii
目次 ---------- iii
図表一覧 ---------- v

１．はじめに ---------- 1
２．リニアメント抽出のアルゴリズム ---------- 2
2.1　概要 ---------- 2
2.2　地形構造特性の認識 ---------- 3
2.3　リニアメントの地形特徴量による線素抽出の考え方 ---------- 8
2.4　流路の定義と抽出 ---------- 10
2.5　斜面傾斜変換線の認識 ---------- 15
2.6　山地・平野直線境界 ---------- 18
2.7　STA による線素連結 ---------- 20
2.8　グループのスコアリング ---------- 22
2.9　リニアメントの抽出 ---------- 23
2.10　リニアメントの傾斜推定方法 ---------- 37
2.11　シュミットネットによる比較と構造の推定 ---------- 40
2.12　解析パラメータの検討が必要な項目 ---------- 45
３．10m メッシュ DEM による幌延地域のリニアメント解析 ---------- 47
3.1　利用したデータと解析地域 ---------- 47
3.2　対象地域の地質と地形 ---------- 50
3.3　対象地域の地形構造特性 ---------- 54
3.4　対象地域の傾斜特徴 ---------- 56
3.5　流路の抽出とパラメータ設定 ---------- 60
3.6　傾斜変換線の抽出 ---------- 64
3.7　山地/平野直線境界の抽出 ---------- 71
3.8　線素の連結（予備解析） ---------- 82
3.9　項目間のスコアリング重みの検討 ---------- 84
3.10　線素の連結パラメータの検討 ---------- 104
3.11　線素のふらつきと標高値によるリニアメントの傾斜推定 ---------- 122
４．本解析のまとめと検討 ---------- 133
4.1　地形構造特性 ---------- 133
4.2　流路の定義と流路密度 ---------- 133
4.3　傾斜の変換線とその特徴 ---------- 135

4.4　山地/平野直線境界の検出 ---------- 137
4.5　スコアリング重みの決定 ---------- 138
4.6　線素の連結パラメータの検討 ---------- 139
4.7　リニアメント篩い分けの閾値の検討 ---------- 140
4.8　リニアメントの傾斜推定 ---------- 140
4.9　抽出されたリニアメントと既存文献との対比 ---------- 144
4.10　対象地域北西部のリニアメント特性 ---------- 151
4.11　おわりに ---------- 165
参考文献 ---------- 166

図表一覧

図 2.1　リニアメント抽出作業フロー ---------- 2
図 2.2　ガウシアンモデルのセミバリオグラム ---------- 3
図 2.3　標高段彩図，陰影図および傾斜量図 ---------- 4
図 2.4　阿武隈山地の傾斜のバリオグラム ---------- 5
図 2.5　全領域で計測した方位別バリオグラム ---------- 6
図 2.6　領域別の方位別バリオグラムと構造特性図(ローズダイアグラム) ---- 7
図 2.7　類型化したリニアメントの地形特徴 ---------- 9
図 2.8　日吉川流路と判読した谷頭位置 ---------- 10
図 2.9　谷頭付近の地形特徴量　(5mDEM　日吉川流域) ---------- 11
図 2.10　定義の違いによる流路抽出結果 ---------- 12
図 2.11　定義の違いによる水系密度の比較 ---------- 13
図 2.12　流路の分割 ---------- 14
図 2.13　傾斜変換線の検出過程 ---------- 17
図 2.14　山地・平野直線状境界検出過程 ---------- 19
図 2.15　線素連結方法　STA 法　(Segments Tracing Algorithm) ---------- 20
図 2.16　STA による線素連結の初期状態 ---------- 20
図 2.17　リニアメント抽出過程と各ステップでのローズダイアグラム -------- 24
図 2.18　構造パラメータの効果 ---------- 25
図 2.19　試験地域の地質図（東北地方土木地質図編纂委員会,1988） ---------- 26
図 2.20　陰影図から判読したリニアメント分布図 ---------- 27
図 2.21　自動抽出したリニアメント分布図（50mDEM） ---------- 28
図 2.22　リニアメント抽出に利用した水系情報 ---------- 29
図 2.23　STA 法による線素連結初期 ---------- 30
図 2.24　STA 法による線素連結終了状態 ---------- 31
図 2.25　スコア 7 以下のグループ ---------- 32
図 2.26　スコア 8～13 のグループ ---------- 33
図 2.27　スコア 14～15 のグループ　---------- 34
図 2.28　スコア 16～17 のグループ ---------- 35
図 2.29　スコア 18 以上のグループ ---------- 36
図 2.30　抽出したリニアメントの投影軸(黒)と構成線素(紫) ---------- 37
図 2.31　構成線素の投影断面と推定されたリニアメント傾斜 ---------- 38
図 2.32　推定されたリニアメントのシュミットネット ---------- 40
図 2.33　双葉断層南部の地質図・地質断面図 ---------- 44
図 3.1　対象地域位置図（赤枠内） ---------- 48
図 3.2　対象地域付近の地質図（年代） ---------- 49

図 3.3　対象地域の陰影図，断層および対比資料に利用したリニアメント ----51
図 3.4　対象地域の地質図 ----------52
図 3.5　対象地域周辺の海成段丘および地殻変動量 ----------53
図 3.6　対象地域を含めた地質構造特性 ----------54
図 3.7　対象地域の地形図 ----------57
図 3.8　対象地域の標高 ----------58
図 3.9　対象地域の傾斜と地質図の比較 ----------59
図 3.10　谷頭を定義するラプラシアンと抽出される流路 ----------60
図 3.11　直線と見なせる区間で分割した流路 ----------61
図 3.12　平野部を除去(閾値<0.25)した流路と地質との関係 ----------62
図 3.13　傾斜変換線の抽出結果(オペレータサイズ 24 メッシュ) ----------66
図 3.14　傾斜変換線の抽出結果(オペレータサイズ 36 メッシュ) ----------67
図 3.15　傾斜変換線の抽出結果(オペレータサイズ 48 メッシュ) ----------68
図 3.16　傾斜変換線の抽出結果(オペレータサイズ 72 メッシュ) ----------69
図 3.17　DEM に認められる斜面の緩急の繰り返し ----------70
図 3.18　目視で明瞭な山地/平野境界とその拡大 ----------71
図 3.19　山地/平野直線境界の抽出結果(1) ----------72
図 3.20　山地/平野直線境界の抽出結果(2) ----------73
図 3.21　山地/平野直線境界の抽出結果(3) ----------74
図 3.22　山地/平野直線境界の抽出結果(4) ----------75
図 3.23　山地/平野直線境界の抽出結果(5) ----------76
図 3.24　山地/平野直線境界の抽出結果(6) ----------77
図 3.25　山地/平野直線境界の抽出結果(7) ----------78
図 3.26　山地/平野直線境界の抽出結果(8) ----------79
図 3.27　スコア評価に利用したグループデータ ----------83
図 3.28　項目のスコア重み　Case 1 ----------85
図 3.29　項目のスコア重み　Case 2 ----------86
図 3.30　項目のスコア重み　Case 3 ----------87
図 3.31　項目のスコア重み　Case 4 ----------88
図 3.32　項目のスコア重み　Case 5 ----------89
図 3.33　項目のスコア重み　Case 6 ----------90
図 3.34　項目のスコア重み　Case 7 ----------91
図 3.35　項目のスコア重み　Case 8 ----------92
図 3.36　項目のスコア重み　Case 9 ----------93
図 3.37　獲得スコアによるグループ（黒）の
分布と方位特性［グループ長が定義に達しない］
グループ長の閾値＝グループ平均長の半分以下（295m） ----------96

図 3.38　獲得スコアによるグループ（黒）の分布と方位特性［スコア 15 未満］97
図 3.39　獲得スコアによるグループ（黒）の
分布と方位特性［スコア 15 以上 18 未満］----------98
図 3.40　獲得スコアによるグループ（黒）の
分布と方位特性［スコア 18 以上 21 未満］----------99
図 3.41　獲得スコアによるグループ（黒）の
分布と方位特性［スコア 21 以上 23 未満］----------100
図 3.42　獲得スコアによるグループ（黒）の
分布と方位特性［スコア 23 以上 25 未満］----------101
図 3.43　獲得スコアによるグループ（黒）の分布と方位特性［スコア 25 以上］102
図 3.44　リニアメントを篩い分ける閾値の検討 ----------103
図 3.45　線素連結・追加時に設定したふらつき許容幅 ----------104
図 3.46　線素連結初期段階 ----------106
図 3.47　分割された流路の方位特性 ----------107
図 3.48　連結パラメータを変更したリニアメント連結・抽出結果 ----------110
図 3.49　連結パラメータ［Case_A3］のリニアメント抽出結果 ----------111
図 3.50　連結パラメータ［Case_A6］のリニアメント抽出結果 ----------112
図 3.51　連結パラメータ［Case_A9］のリニアメント抽出結果 ----------113
図 3.52　連結パラメータ［Case_B3］のリニアメント抽出結果 ----------114
図 3.53　連結パラメータ［Case_B6］のリニアメント抽出結果 ----------115
図 3.54　連結パラメータ［Case_B9］のリニアメント抽出結果 ----------116
図 3.55　連結パラメータ［Case_C3］のリニアメント抽出結果 ----------117
図 3.56　連結パラメータ［Case_C6］のリニアメント抽出結果 ----------118
図 3.57　連結パラメータ［Case_C9］のリニアメント抽出結果 ----------119
図 3.58　篩い分けられたリニアメントの方位特性[閾値=5%] ----------120
図 3.59　ケース A3 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット -------124
図 3.60　ケース A6 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット -------125
図 3.61　ケース A9 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット -------126
図 3.62　ケース B3 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット -------127
図 3.63　ケース B6 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット -------128
図 3.64　ケース B9 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット -------129
図 3.65　ケース C3 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット -------130
図 3.66　ケース C6 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット -------131
図 3.67　ケース C9 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット -------132
図 4.1　連結された傾斜変換線(オペレータサイズ＝480m) ----------135
図 4.2　斜面方位図 ----------136

図 4.3　決定した山地/平野直線境界 ---------- 137
図 4.4　ケース A3,A6,B3 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット - 142
図 4.5　A3,A6,B3 の重複するリニアメント ---------- 143
図 4.6　地質図の断層と判読されたリニアメント ---------- 144
図 4.7　1/5 万地質図（豊富）と判読されたリニアメントおよび断層 ---------- 145
図 4.8　自動抽出したリニアメント,
　　判読されたリニアメントおよび断層の比較 ---------- 147
図 4.9　判読されたリニアメントの密度(全方位と方位別) ---------- 148
図 4.10　A3,A6,B3 を合算したリニアメントの密度(全方位と方位別) ---------- 149
図 4.11　A3,A6,B3 で重複するリニアメントの密度(全方位と方位別) ---------- 150
図 4.12　北進地域の陰影図 ---------- 159
図 4.13　北進地域の水系図 ---------- 159
図 4.14　北進地域の地質図(JNC TJ1400 98-001　を引用) ---------- 159
図 4.15　北進地域の地質図「豊富」(縮尺 1/5 万,「豊富」図幅, 1968) ---------- 159
図 4.16　北進地域のリニアメント分布図と推定されたリニアメント傾斜 ---------- 160
図 4.17　北進地域の判読されたリニアメントの密度分布図 ---------- 161
図 4.18　北進地域のリニアメント自動抽出結果と
　　地質断層および判読されたリニアメントの比較 ---------- 162
図 4.19　北進地域の自動抽出されたリニアメントの密度分布図 ---------- 163
図 4.20　北進地域で自動抽出されたリニアメントの傾斜方向 ---------- 164

表 3.1　使用したデータの図幅名(縮尺 1:25,000) ---------- 47
表 3.2　地質単元と主な層相 ---------- 63
表 3.3　項目間の重みの検討 ---------- 84
表 3.4　項目の重みを変化させて抽出したグループと
　　判読したリニアメントとのローズダイアグラムによる比較 ---------- 94
表 3.5　線素連結パラメータの組合せ ---------- 108
表 3.6　線素連結パラメータの組合せ ---------- 110
表 3.7　リニアメント数と傾斜の計算されたリニアメント ---------- 122

１．はじめに

本調査の目的は，リニアメントとして判読されるような地形に現れる特徴に注目し，精密な DEM から地形特徴量を利用して明確な定義からリニアメントを自動的に抽出し，評価することを目的とする。また，リニアメントとして判読される地形特徴の系統的な屈曲からリニアメントの傾斜を推定することで 3 次元的な断裂系の解析手法を適応させることも目的の１つとした。

空中写真によるリニアメント判読は，トンネル施工時などの事前調査，ダム建設時の地質調査などに利用されてきている。しかしながら，これまでリニアメントとして判断してきた判読基準は曖昧なものであり，物理的な現象として定義されることはなかった。故に，判読者による個人差が大きく，これらのことがリニアメントを科学的な根拠とするには抵抗がある原因となっている。

リニアメントを画像から自動抽出する手法については，これまでいくつかの研究がある(Chorowitz et al.,1992, Koike et al., 1995, Lu et al., 1990)。これらは画像情報を利用することから基本的には直線的な陰影境界を追跡するものである。ただし，陰影情報は光源方向に大きく依存し，光源と平行する方向では検出されにくく，また，斜交する方向では見かけ上の形成される直線的な陰影境界をリニアメントとして抽出してしまうなどの問題がある。

リニアメントの陰影境界の位置と DEM による標高の情報からリニアメントを形成する断裂面の傾斜を推定した研究もある(Koike et al., 1998)。これは光源方向を考慮し，陰影境界を抽出(これを線素と呼ぶ)し，この連続性を検出することで，その屈曲と標高から断裂面の傾斜を推定するものである。これらの研究でのリニアメント追跡は，基本的に直線的な谷筋の連続性を検出するものであるが，抽出されたリニアメントの物理的な意味づけがなされていないことが特徴である。

本件で対象としたリニアメントとは，地形に現れる直線的な，あるいは緩やかにカーブした連続的な地形であり，地形に現れた凹地あるいは凹地の配列として認識できるものを対象とする。これらは断層，破砕帯などの構造的特徴を反映する場合もあるが，偶発的な配列によって認識される場合もある。したがって，本件で抽出されるリニアメントは必ずしも判読によるリニアメントと一致するものではない。ただし，地形特徴から明確な定義で抽出されるものであることから，これら偶発的に現れるリニアメントは，一定の密度で現れ，方位特性をもたないものと推定される。したがって，地形特徴から抽出したリニアメントがある領域に，特定の方向性をもって集中する場合には，なんらかの構造的な支配を受けている可能性が高いと判断する。

本件では，幌延町を含む地域の断裂系を把握するため DEM によるリニアメント調査を実施した。

2．リニアメント抽出のアルゴリズム

ここでは，国土地理院 50mDEM(Digital Elevation Model)を用いた阿武隈山地での例を用いてリニアメント抽出方法のアルゴリズムについて解説を行う。

2.1　概要

本件では，以下のアルゴリズムに従って，リニアメントの抽出を実施した。

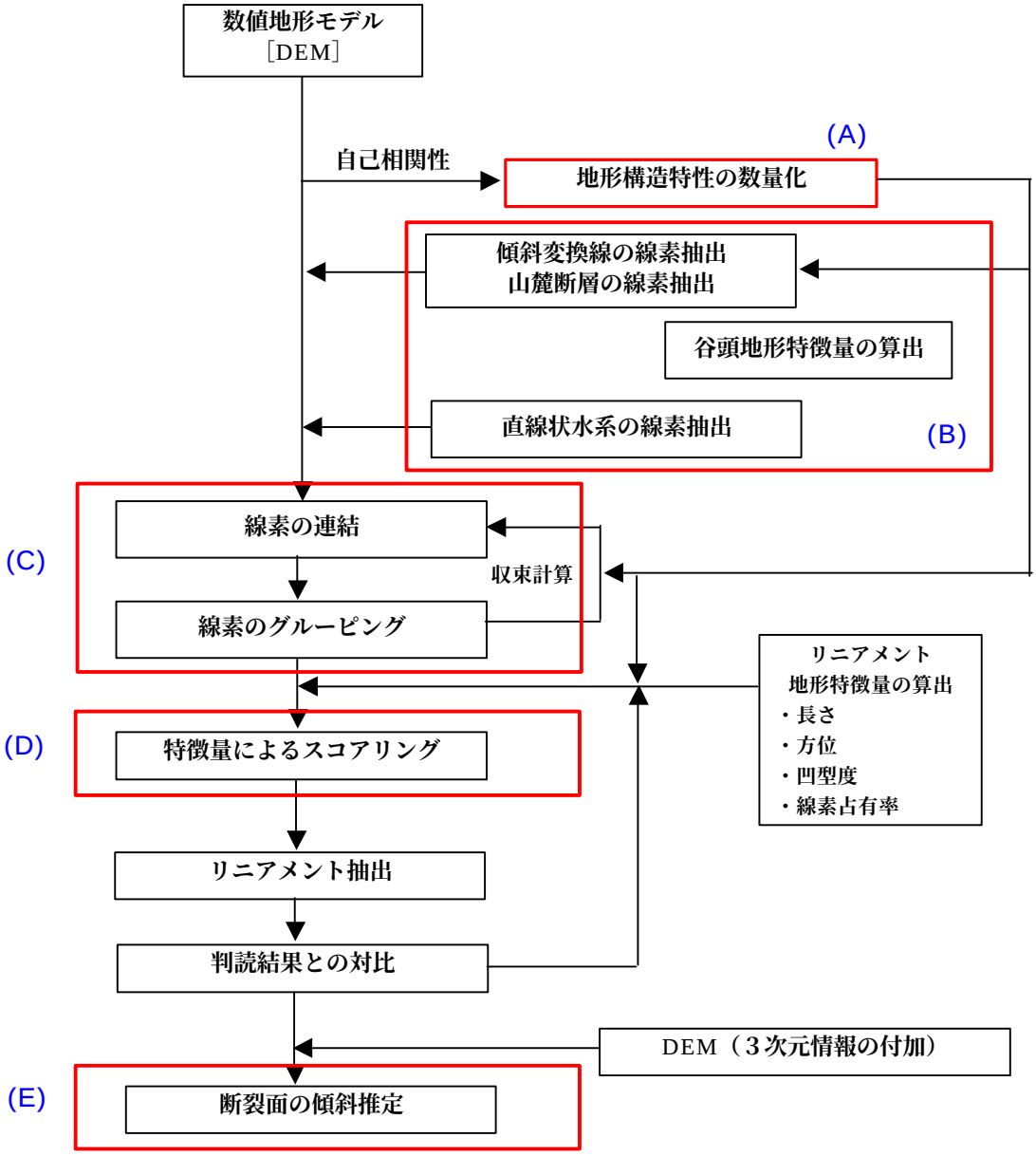


図 2.1　リニアメント抽出作業フロー

図 2.1 の(A)～(E)に示したように，作業は大きく 5 つのステップからなる。

(A)地形構造特性の数量化：解析地域の地形構造特性を方位別に計測し，リニアメントの構成要素(線素)の探索距離を決定する。なお，数量化には傾斜の自己相似性を利用する。

(B)線素の抽出：判読されるリニアメントの地形特徴を参考として，DEM からリニアメントを構成する線素を抽出する。
(C)線素の連結：認識した線素の探索によって連結を行い，探索すべき線素が無くなった状態まで検索と連結を繰り返す。これをグルーピングと呼び，グルーピングされた線素群（以下，グループと呼ぶ）をリニアメントの候補とする。
(D)リニアメントの候補について，線素沿いに地形特徴量(ここでは谷の深さ)，グループ長，グループ方位，グループ長に占める線素構成比を算出し，スコアリングによって抽出されたリニアメントの篩い分けを行う。
(E)リニアメントの傾斜推定：篩い分けされたリニアメントを構成する線素の位置情報から，投影断面を作成し，線素構成点の配列に規則性が見られる場合には，これら分布傾向から傾斜を算出する。

2.2　地形構造特性の認識

衛星画像や空中写真からのリニアメント判読では，画像に認められる大局的な構造(地形構造特性)を認識した後に，細部の判読へとスケールダウンを行う。その際には大局的な構造を考慮して細部の判読が実施される。したがって，DEM から直接リニアメントを抽出する手法においても大局的な地形構造特性を認識することは重要なプロセスと考えられる。

地形は連続面であり，標高は連続的に変化する。したがって，標高値は値同士の空間的な相互関係があり，個々の値は独立ではない。このようにある 2 点のデータが距離に応じてどのような相似性があり，距離に応じてどのように変化するかを計る方法としてセミバリオグラム(Matheron,1963)がある。例えば鉱石の品位は 2 点間の距離が近いほど品位は似通った値を示し，距離が離れるに従い相関性は一般に低くなる。この性質を利用し，2 点間の距離と両者の品位の分散を様々な点で計測しセミバリオグラムを作成すると，空間的な自己相似性を決定することができる。この空間的な自己相似性にはいくつかのタイプがあるが，代表的なものとして球形やガウシアン関数によるモデルなどがある(図 2.2)。

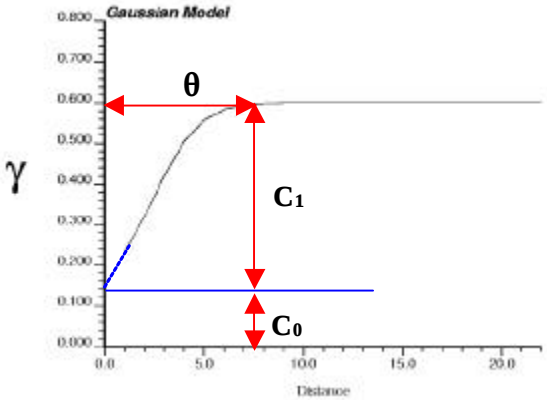


図 2.2　ガウシアンモデルのセミバリオグラム

$\gamma = C_0 + C_1\{1-\exp(-|h|/\theta)^2\}$　$|h| < \theta$

$\gamma = C_0 + C_1$　$|h| \geqq \theta$

C_0：ナゲット
C_1：シル
θ：レンジ

セミバリオグラムがどのモデルに類似するかはセミバリオグラムを作成し，これと最も類似するモデルを選択する。例えばガウシアンモデルの場合では，セミバリオグラムはシル, ナゲットおよびレンジと呼ばれる 3 つのパラメータで空間的な自己相似性を定義する。

レンジ(θ)は自己相関性が無くなる距離であり，シル(C_1)は自己相関性が無くなる時の分散を表し，ナゲット(C_0)は距離 0 付近での分散を意味する。通常ナゲットは微小距離での分散であるため分析誤差あるいは微小距離での品位の不均一性などと解釈される。

地形をバリオグラムで表現する場合には，標高値あるいは傾斜を利用することが考えられる。標高でバリオグラムを考えた場合には，シルが現れるまでの距離であるレンジは地形の波長を表すと考えられ，谷間隔の粗い山地，すなわち波長の長い山地では大きなレンジが得られる。また，ナゲットは微小距離での標高変化，すなわち勾配を意味する。

傾斜でバリオグラムを表現する場合には，レンジは類似した傾斜からなる斜面の連続性を意味し，標高を用いた場合とは意味が異なったものとなる。この場合，ナゲットは微小距離での傾斜の変化を表し，ラプラシアン，つまり斜面形状の違いを表すものとなる。つまり，水系が細かく発達する場合には，ラプラシアンの変化は大きく，滑らかな斜面では傾斜の変化が小さいことからナゲットは小さくなる。なお，傾斜が等しく，尾根を挟んで反対側を向いた斜面を考えると，方位角は関係しないことから両斜面は自己相関性の強い斜面であると言える。

このようにバリオグラムの解析に標高値と傾斜を利用できるが，地形特徴を表すためには傾斜がより有効である。DEM から作成した傾斜量図は，しばしば明瞭な地質構造の特徴を表す場合が多い。図 2.3 は阿武隈山地の段彩図，陰影図，傾斜量図であり，傾斜量図で NNW-SSE の構造があることがより明瞭に読みとれる。

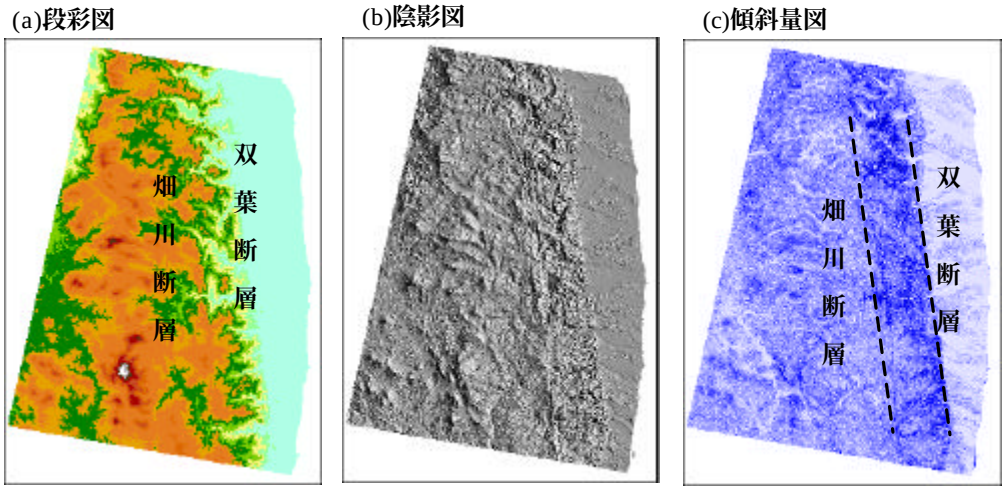


図 2.3　標高段彩図, 陰影図および傾斜量図

野上(2001)が提唱した地形変化式では，(直線)斜面勾配が隆起速度に比例，拡散係数(浸食のされやすさ)に反比例する。したがって，傾斜量が地質や構造を反映しやすいことが関係

式からもわかる。

$$g/k \propto s^{2}/4r$$

(g：隆起速度　k：拡散係数　s：直線斜面勾配　r：局所起伏量）　野上(2001)

傾斜を利用して自己相似性を表すと, 図 2.4 の様なセミバリオグラムを得ることができる。

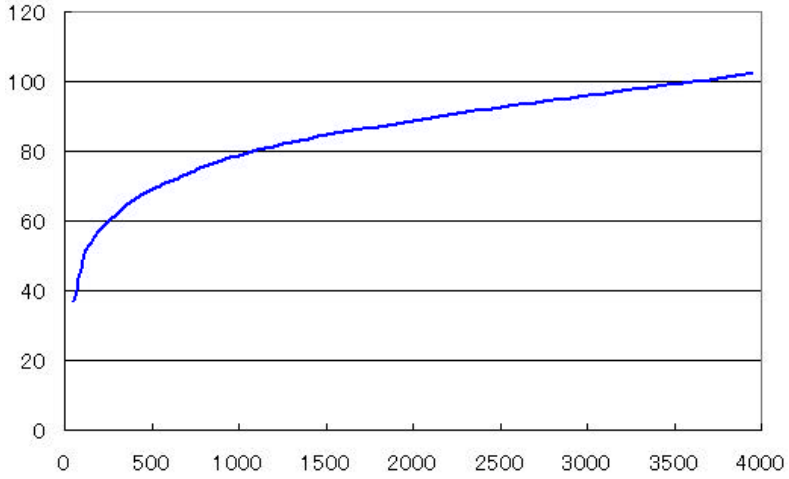


図 2.4　阿武隈山地の傾斜のバリオグラム
(横軸 :距離　縦軸 :セミバリオグラム)　全方位で計測

このときセミバリオグラム値は距離と共に増加し自己相似性は弱まっていく。図 2.3 で示したように，傾斜量図は構造特性を明瞭に反映する。この理由は，傾斜が岩石の硬さ(地質)や構造運動に依存するためである。図 2.3 で示したように対象地域には南北 2 本の大きな構造があり，比較的類似した傾斜が連続する。したがって，大局的な構造に沿った方向では傾斜の自己相似性は強く，逆に直交する方向では弱くなると考えられる。

方位によって自己相似性が異なるとすれば，あるセミバリオグラム値までの距離の違いは同じような傾斜変化が現れるまでの距離の違いを表すと考えることができる。つまり，一定の地形変化が現れるまでの範囲を眺めるためには，セミバリオグラム値が同じ値となるまでの距離を方位別に算出しておけばよいことになる。

図 2.5 は対象地域全域で作成した 8 方位(N～SSE までの片側)のセミバリオグラムである。図で示したように方位によってセミバリオグラムの傾きが変化していることがわかる。このうち最も傾きの緩いセミバリオグラムは N-S ないし NNW-SSE 方向，最も傾きの大きなセミバリオグラムは NE-SW ないし ENE-WSW であり，両者はほぼ直交する関係にある。対象地域では N-S ないし NNW-SSE の構造が卓越することから，セミバリオグラムの特徴は地形構造特性と整合している。

以上のことから，あるセミバリオグラム値までの距離が最も短くなる方向を 1 として地形構造特性を距離比によって数量化した。この場合，構造が卓越する方向ではあるセミバ

リオグラム値までの距離は長くなるため，1 以上の値を取ることになる。なお，距離を計測するセミバリオグラム値は，全領域で全方位のセミバリオグラムを作成し，距離 1,000m の時のセミバリオグラム値を利用するものとした。この距離 1,000m とは，線素連結時の検索最大距離に近い値である。

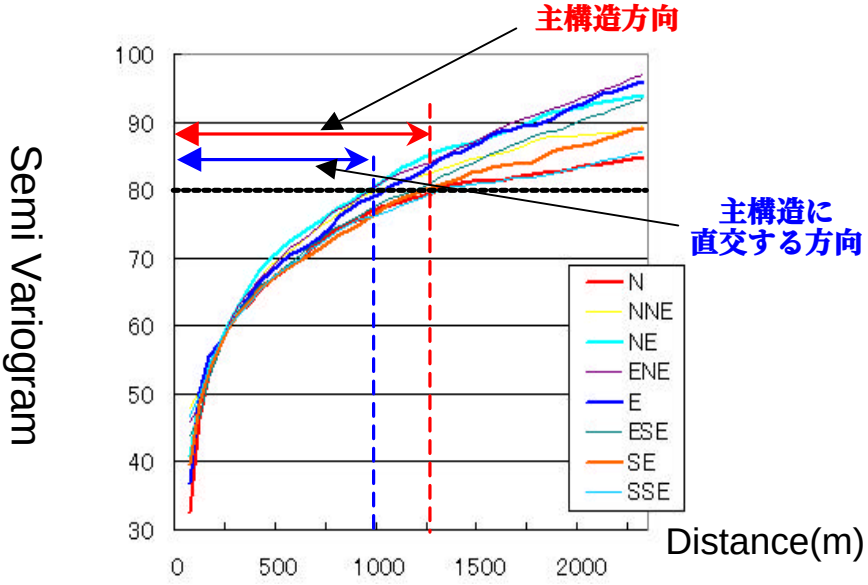


図 2.5　全領域で計測した方位別バリオグラム

図 2.6 は対象地域を 4 分割し，それぞれの領域で方位別セミバリオグラムを算出した結果である。ローズダイアグラムは方位別の距離比を表し，扁平なローズダイアグラムが出現する地域ほど長軸方向の地形構造が卓越していることを意味する。畑川および双葉断層が位置する東側の領域では N-S ないし NNW-SSE の構造が卓越し，構造の異方性は短軸方向の 1.5～2 倍以上に達していることを示している。これに対し，北西の領域では明瞭な構造特性を示しておらず，また傾斜量図にも特徴的な卓越方向は認められない。南西領域は傾斜量図では卓越方向を読みとることができないが，ローズダイアグラムでは NW-SE 方向に長軸方向が伸びており，構造に異方性があることを示している。この領域の地質図には NW-SE 系の構造が存在し，また，リニアメント判読図でもこの方向にリニアメントが卓越している。したがって，バリオグラムによる構造特性の数量化は構造特性をよく表現できていると考えられる。

線素連結時の探索距離係数に数量化された構造特性値を利用することで，細部の連結に地形構造特性を反映させることができる。なお，構造特性値は 4 領域で計算し，任意点での構造パラメータは，4 領域からの距離比に応じ共一次内挿法によって算出した。なお，共一次内挿法とは内挿したい点の周囲の 4 点の値を用いて，線形式で内挿値を求める方法である。

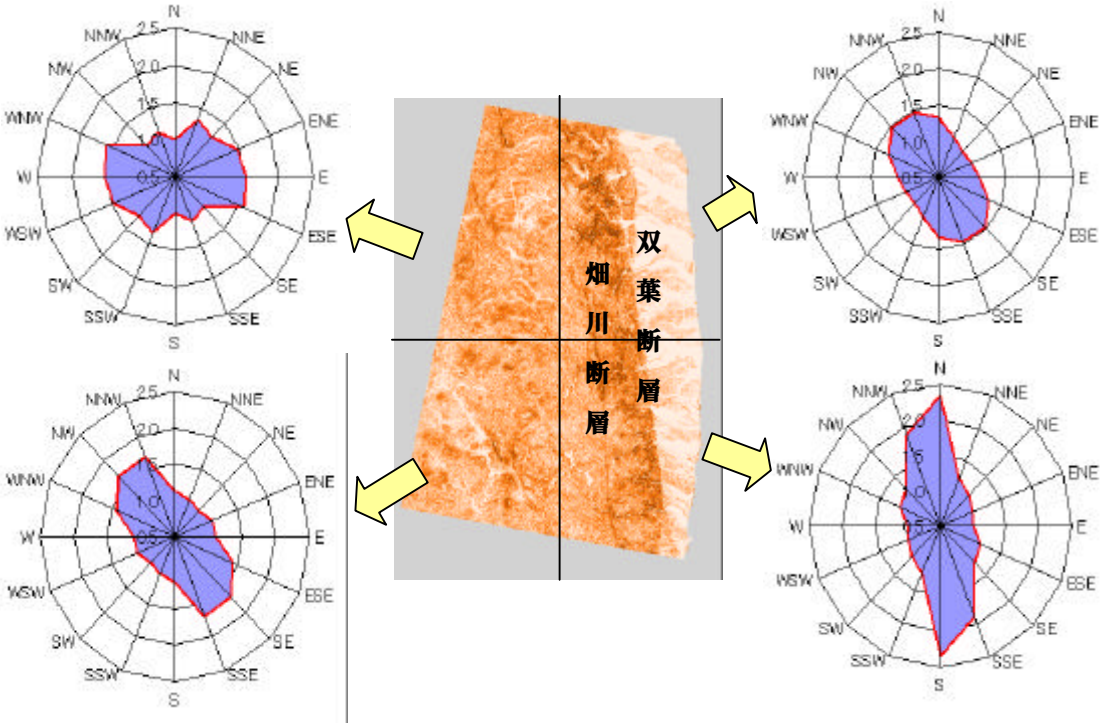


図 2.6　領域別の方位別バリオグラムと構造特性図(ローズダイアグラム)

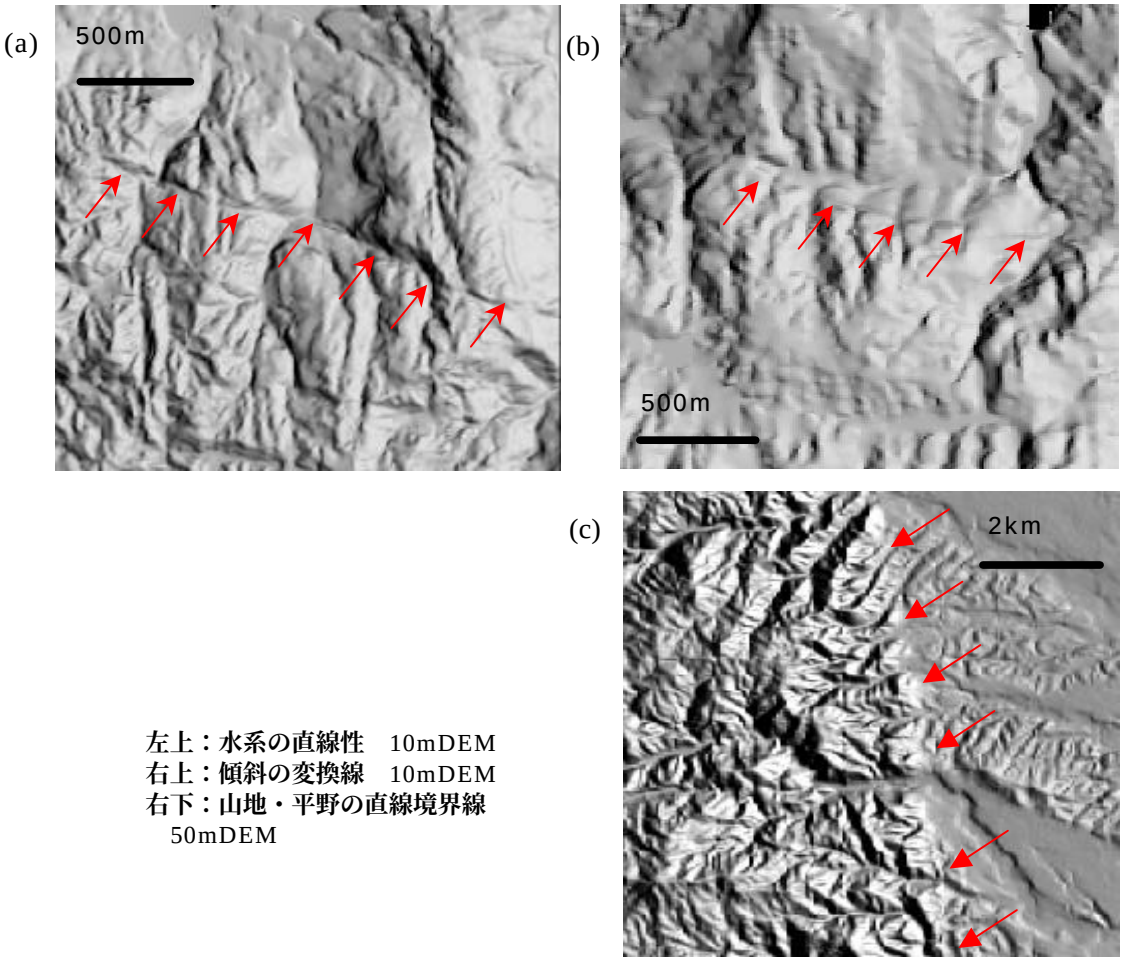
2.3　リニアメントの地形特徴量による線素抽出の考え方

リニアメントは様々な地形特徴に注目して判読される。ここでは判読されるリニアメントを大きく 3 つに類型化し，それぞれについて地形特徴量からリニアメントを構成する線素の抽出方法を検討した。

図 2.7 には 3 つに類型化したリニアメントの地形特徴を示した。判読されるリニアメントの多くは，(a)に示すような直線的な流路であり，これは落水線方向に直交する正のラプラシアンの連続性から認識できる。2 つ目は(b)のような斜面の傾斜変換線であり，これは落水線方向に現れたラプラシアンの異常値の連続性から認識可能である。落水線方向のみにラプラシアンを計算する理由は，斜面下方に向かって傾斜変換点を計測することが理由である。

これら 2 つのリニアメントが持つ地形特徴は，小領域の地形特徴から計算できる。また，計算した特徴の連続性を短い線分(線素)で表現することで，リニアメントを構成する要素を抽出することができる。

3 つめは山麓と平野とが直線的な境界を持つ場合に推定されるリニアメントである。ただしこれら境界は巨視的には直線的であっても，微視的には入り組んだ境界を持っている。このため接峰面図作成手法と類似した手法で算出した傾斜図を作成し，これを微分することで大局的な地形の傾斜変換線を線素として抽出するものとした。



左上：水系の直線性　10mDEM
右上：傾斜の変換線　10mDEM
右下：山地・平野の直線境界線
50mDEM

図 2.7　類型化したリニアメントの地形特徴

2.4　流路の定義と抽出

落水線方向に直交する断面のラプラシアンが正の値(凹)からなり，これらが連続する位置は流路と一致する。ここでは流路抽出アルゴリズムを利用して，流路をベクタで出力，利用するものとした。このときに問題となるのは流路先頭(谷頭)をどのように定義するかにある。流路抽出する場合には，流域面積で谷頭を定義する方法が簡便であることからパッケージソフトなどで利用されている。ただし，この方法で定義した流路は判読による流路とは必ずしも一致しない。特に緩斜面域での谷頭位置が不正確であり，明瞭な谷形状を示していなくても流路が抽出されている場合が多い。これは緩斜面では一般に集水面積が大きくならないと谷頭(凹地形)は形成されないためである。このため緩斜面の判読結果に一致するように谷頭を定義する面積を大きくすると，山間部で明瞭な谷地形が存在するのに，集水面積が小さいことから流路が抽出されない結果となってしまう。リニアメントの抽出には流路を利用することから，この地形特徴と流路との不一致は抽出結果に誤りをもたらす可能性がある。このため谷頭の定義方法について検討を行った。

図 2.8 は日吉川で作成した 5mDEM の陰影図から約 1,400 流路の谷頭を判読し，谷頭の位置をプロットしたものである。これら谷頭付近の地形特徴量(流域面積，流域平均傾斜および直交方向の地形断面)を 5mDEM から計測し，谷頭付近で変化する地形特徴量を検討した。

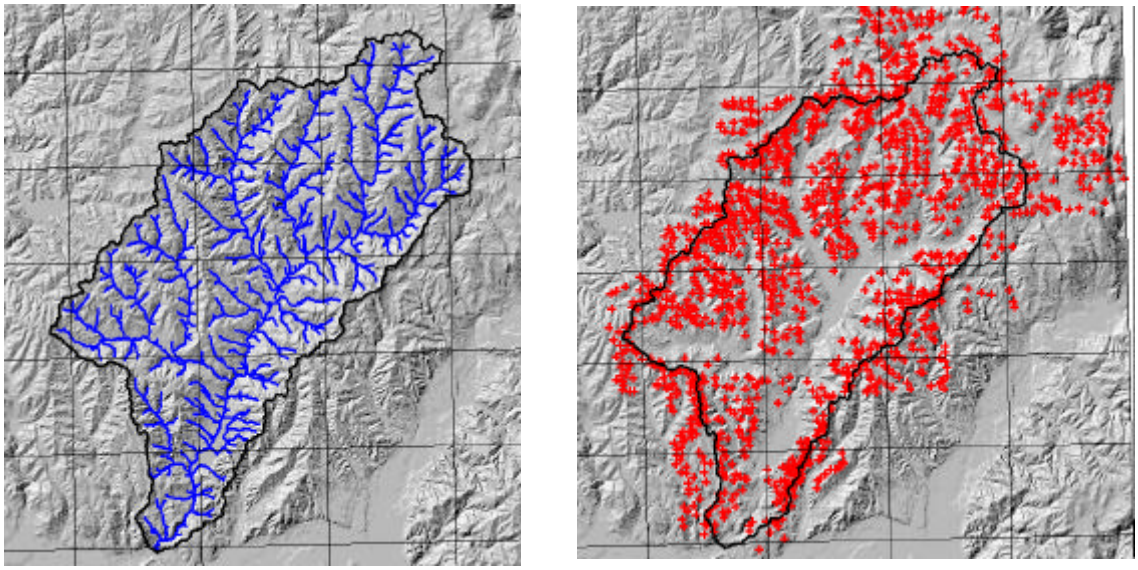


図 2.8　日吉川流路と判読した谷頭位置
1,483 地点

判読した谷頭の位置を集水面積と集水域の平均傾斜で集計すると明瞭な関係が見えてくる。図 2.9(a)は集水面積毎に集水域の平均傾斜を集計し，平均値をプロットしたグラフである。このグラフは，急斜面では集水面積が小さい斜面上部に谷頭は位置し，緩斜面では集水面積が大きくなる斜面下方に谷頭が位置することを表している。つまり，集まる水の量

と流速によって決定される下刻作用の大きさによって谷頭位置が決定されることを意味している。厳密には，これに加えて浸食に対す抵抗力の差(岩石種)や地表を覆う植生が関与する。

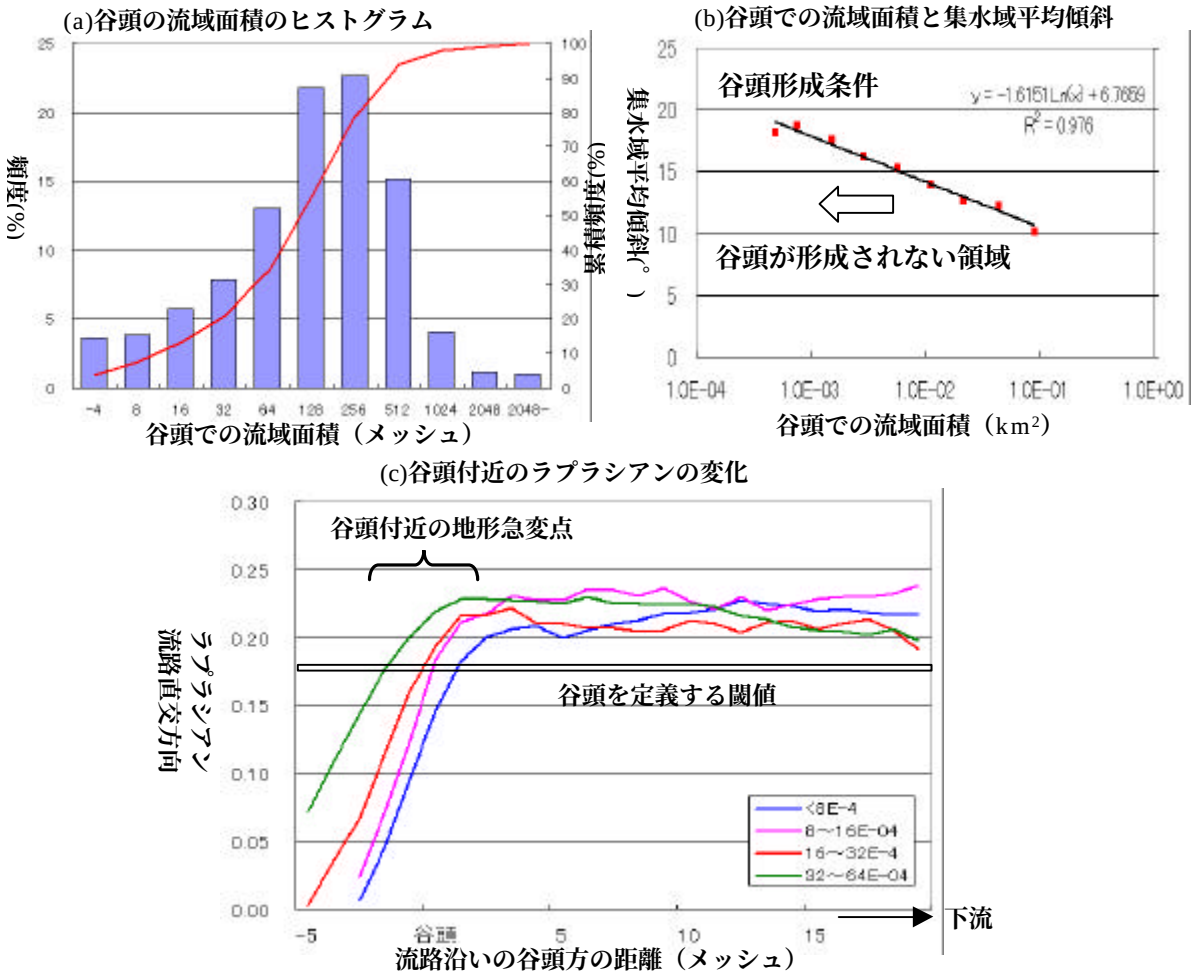
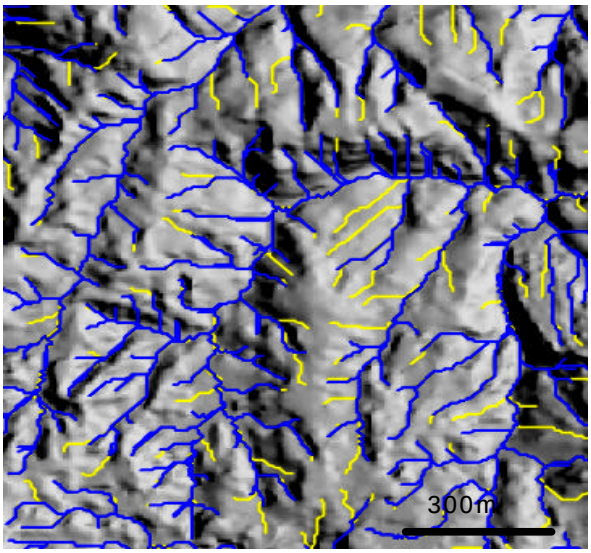


図 2.9 谷頭付近の地形特徴量 (5mDEM 日吉川流域)

ただし，判読ではこのような関係から谷頭を定義しているのではなく，もっと直接的な地形変化から谷頭を定義しているはずである。ここでは谷頭付近の地形変化を検討するために，谷頭前後の位置で流路に直交するラプラシアン変化を検討した。

図 2.9(c)には判読した谷頭位置から，上流側 5 画素，下流側 20 画素(5mDEM で検討)までの区間について，流路に直交する方向のラプラシアンの変化を表した。なお，色の違いは谷頭位置での流域面積に応じて分類している。この検討から，谷頭が判読されている位置付近でラプラシアンが大きく変化していることが解る。つまり，判読者は谷の開き具合の変化から谷頭を決定していることを意味している。したがって，上流側から順次，流路のラプラシアンを計測し，ラプラシアンが閾値(0.18)を超えた地点を谷頭と定義できることを表している。

図 2.10 は集水面積から定義した流路(黄色)とラプラシアンの変化から定義した流路(青色)を比較した図である。特に緩斜面において流路の差が顕著であり，集水面積で定義した流路は凹地形が見られない上流まで流路が伸びていることが解る。これに対し，ラプラシアンによる流路は判読とほぼ類似した位置に谷頭が現れている。

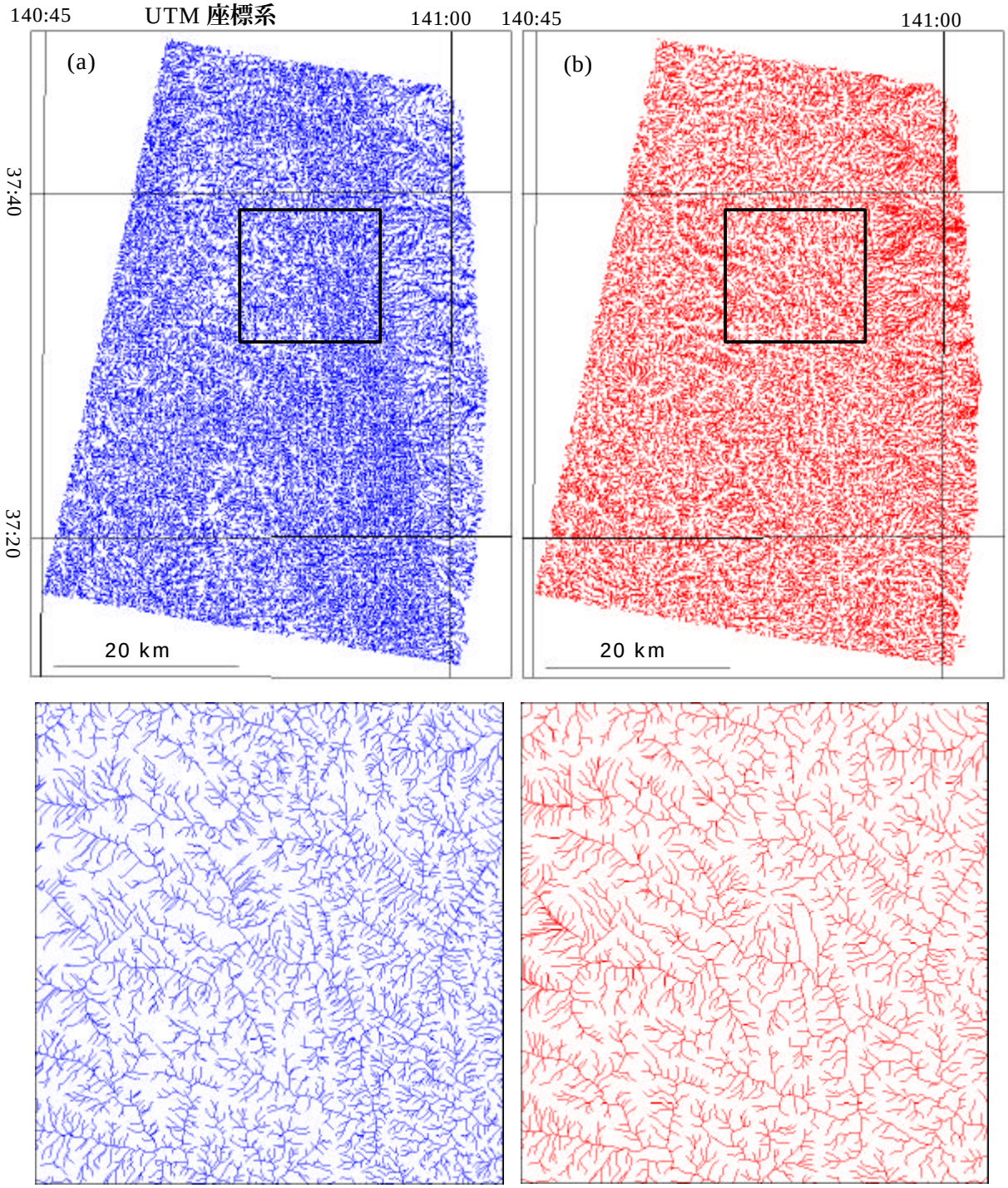


黄色 :谷頭を集水面積により定義した流路
青色 :谷頭を地形形状(ラプラシアン)で定義した流路

図 2.10 定義の違いによる流路抽出結果

谷頭を地形形状で定義すると，水系密度に差が現れるようになる。図 2.11 には谷頭の定義が異なる 2 つの方法で抽出した流路を示した。(a)はラプラシアンの変化から谷頭を定義した水系網であり，(b)は従来法による面積によって谷頭を定義した水系網である。(b)では水系密度に差が現れておらず，このため構造も読みにくい。これに対し(a)では，水系密度に差が現れており，地質によって水系密度差が異なることから構造も判読しやすいことが解る。

これまで水系密度は岩石種など地質によって変化することが知られていたが，(b)で示すような集水面積で定義した水系網からは水系密度に差は通常現れない。これは，面積による定義では，常に一定の確率で谷頭が発生することが原因である。



左：ラプラシアン形状による谷頭定義　　右：流域面積による谷頭定義

下は上の黒枠内の拡大

図 2.11　定義の違いによる水系密度の比較

流路は谷頭から合流点までが 1 つながりの線情報(ベクタ)として記憶される。ただし河川は屈曲しており，このままでは直線と見なせない。よって，以下の作業により直線と見なせる区間に切断し利用した。切断するアルゴリズムは以下である。

①1 つながりの流路情報を読み込み，流路沿いに長さを測定する。

②流路長が 500m を超える場合，流路長を 500 で割った商+1 個で流路を事前に分割する。

③分割された流路について始点・終点と中間点 1 点から河川の屈曲度を計測し，最も屈曲度が大きくなる中間点の位置を検索する。

④最大屈曲度を計測し，10°以上となるならば，この位置で切断する。

⑤切断されたそれぞれの線分について再度，屈曲率が最大となる位置を検索し，屈曲率を計測する。

⑥最大屈曲率が 10° を超える場合に流路をこの位置で切断する。

以上の作業によって，流路に 10°以上の屈曲がある場合は直線と見なせる区間で流路が分割される。ただし，分割される区間が 120m 以下である場合は細かな屈曲と判断し，分割を行わないものとした。

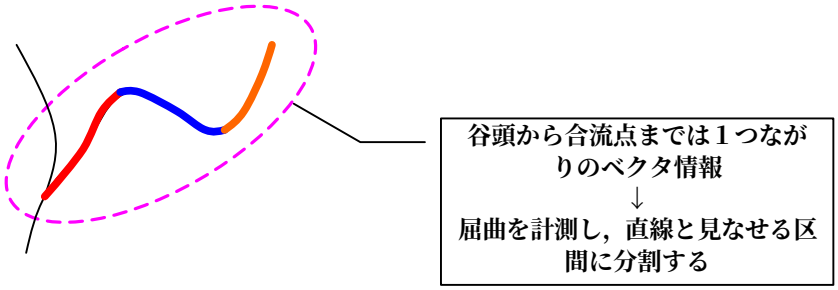


図 2.12 流路の分割

以上の方法によって定義した流路を図 2.12 に示したように直線と見なせる区間に切断し，リニアメントを構成する線素とした。

なお，平野部などでは地形特徴が無くとも流路が形成されるため，流路直交方向でラプラシアンを計測し，ラプラシアンが小さい(<0.20)線素を地形特徴のない流路として解析から除外した。

2.5　斜面傾斜変換線の認識

判読では斜面の傾斜変換線からリニアメントを推定し，判定の重要な地形特徴の１つとなっている(図 2.13(a))。この地形特徴は斜面方向に断面を作成すればその変化が明らかとなる。ここでは，落水線に沿ってラプラシアンを計算し，ラプラシアンの値が設定した閾値を超える点を出力することで傾斜変換線に相当する点群を抽出した(図 2.13(d))。なお，落水線方向でラプラシアンを計算する意味は，斜面断面方向での傾斜変化を検出すると同時に，谷や尾根から算出される絶対値の大きなラプラシアンを除去するためである。

落水線方向の斜面傾斜変換点を検出するためのアルゴリズムは以下である。

①各メッシュの落水線方向を DEM から計算し，落水線方向(北を 1 とし，時計回りに 8 までの数値を与える)の落水線方向マトリックスを全領域において作成する。このとき，凹陥地処理も実施する。

②各点を始点とし，始点から落水線マトリックスに従い，5 メッシュ下流まで追跡を行い，ここを終点とする。

③始点から 2 メッシュ追跡した位置を中間点とし，この位置をラプラシアン計測位置とする。したがって斜面最上部から 2 メッシュの区間では斜面の屈曲は計測されない。

④始点－中間点－終点の 2 区間について距離を計測し，始点－中間点－終点の標高差から中間点位置でのラプラシアンを計測する。

⑤全点について計測を行うが，合流があることから同一点で重複してラプラシアンが計測される場合がある。この場合，最大となるラプラシアンを採用する。

⑥計測した落水線方向のラプラシアンを集計し，平均値と標準偏差を算出する。

⑦閾値(通常は平均値+0.5σ)を設定し，ラプラシアン異常となるメッシュを抽出する。

以上の作業によって，ラプラシアン異常を表現すると図 2.13(d)を得ることができる。この段階ではまだラスタ状態であり，線素に変換するため方向検出オペレータを利用してベクタ化を行う。方位検出オペレータとは図 2.13(b)のようなスリットが空いたマスクであり，このスリットを 10°ごとに回転した 18 個のオペレータを準備する。

ラスタ・ベクタ変換は以下のアルゴリズムで実施する。

①方向検出オペレータのサイズ(ここでは 13×13 メッシュを利用)を決定し，穴の空いたスリットを作成する。プログラムとしては孔の部分に１を，オペレータによって隠される部分には 0 を与える。これを 10 度毎に回転させ 18 種類のオペレータを作成する。

②方向検出オペレータの範囲の中で，ラプラシアン異常が最大となる位置を検索する。ただし最大値は 3×3 領域の平均値から算出するものとする。この作業は斜面屈曲位置が最大となる場所を検索することを意味する。

③検索した位置を方向検出オペレータの中心とし，18 個のオペレータによりスリット中に含まれるラプラシアン異常の個数とラプラシアン異常の平均値を計算する。オペレータは 0/1 であるので, 各メッシュのラプラシアン異常値とオペレータを乗算することでこの

作業が行われる。

④スリット中にラプラシアン異常点が最も多くなる方向を傾斜変換線方向として記憶する。

⑤方向検出オペレータの大きさの半分の距離を移動し，②からの作業を繰り返す。

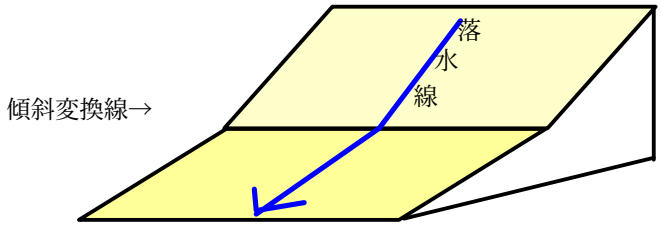
⑥以上の作業を全領域で実施する。なお，方向検出オペレータの半分の距離を移動していることから，同一点で最大４個重複して計算される場合がある。このため，これら重複データを削除する。

⑦重複データを削除後，各点で検出されたラプラシアン異常点数の平均値を算出する。平均値以上の点数からなる傾斜変換線のみをベクタ情報として記憶する。このとき方向検出オペレータのスリット端と中点位置の位置情報を出力する。

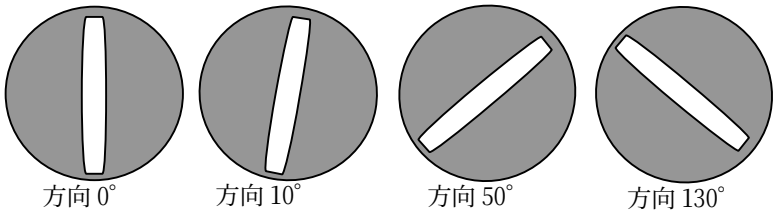
⑧後述する STA アルゴリズムによってベクタ化された落水線方向のラプラシアン異常を連結し, 2 本以上連結された線素のみをリニアメント抽出に利用する線素情報として出力する。

以上のように傾斜変換点は落水線方向のラプラシアンで定義でき，閾値以上を出力することで得られる(図 2.13(d))。この閾値以上の点群が直線状に配列する場合を線素として認識するため，方向検出オペレータを利用し，ベクタ情報として線素の出力を行った(図 2.13(e))。

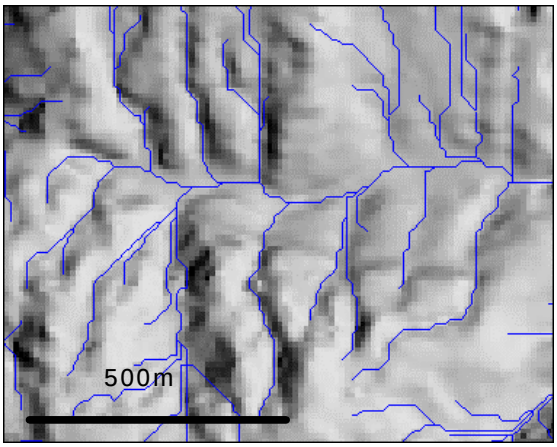
(a)落水線方向のラプラシアン



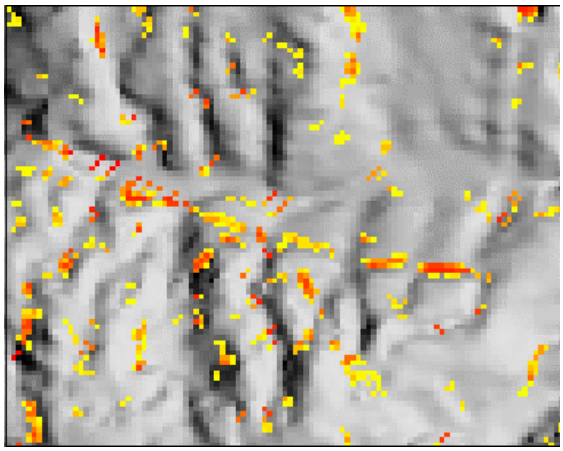
(b)方向検出オペレータ (10° 毎に回転)



(c)陰影図



(d)閾値以上のラプラシアン異常
色の差は異常値の大きさを表す



(e)方向検出オペレータによる線認識
と線素連結結果(赤線)

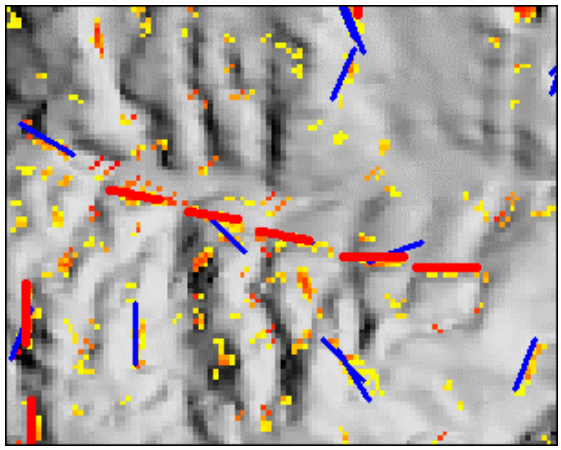


図 2.13　傾斜変換線の検出過程

2.6　山地・平野直線境界

図 2.14(a)で示すように阿武隈山地東縁を画する双葉断層は，目視では明瞭な地形境界として認識できるリニアメントであるが，微視的な境界は入り組んでおり地形特徴の認識には巨視的な視点が必要になる。ここでは空間分解能を 1/4 に落とした傾斜量図を作成し，500m メッシュの接峰面図法に類した方法で最大傾斜量図を作成した(図 2.14(b))。この操作によって細かな起伏をキャンセルすることができ，大局的な構造境界を推定しやすくなる。次に最大傾斜量図について 8 方向でラプラシアンを計算し，その最大値を出力する。この図では，山地・平野の境界では大きなラプラシアン値が現れ，直線状に配列していることが解る(図 2.14(c))。この変曲点を前項と同様に方向検出オペレータによって認識させると，線素の抽出ができる(図 2.14(d))。

山地/平野直線境界の検出アルゴリズムは 2 つのアルゴリズムからなる。1 つは最大傾斜量図作成部であり，もう 1 つは傾斜変換線検出部からなる。最大傾斜量図作成アルゴリズムは以下である。

①DEM から後方差分法によって傾斜を算出する。

②メッシュ区画を 500m とし，500m 区間内で最大値となる傾斜の位置と傾斜角を記憶する。

③全領域において傾斜の最大値を記憶し，500m メッシュを上下左右に半メッシュずらした状態で再度最大傾斜量の位置を取得する。

④検索した最大傾斜量から 2 次曲面の最小二乗法により 30m メッシュの最大傾斜量図を作成する。このときグリッド間隔を徐々に小さくして内挿を行う。ここでは最初に 32 メッシュ間隔(960m 四方)に含まれるデータから中心点の傾斜を最小二乗法で算出した。次に 16 メッシュ間隔(480m)→8 メッシュ間隔(240m)→4 メッシュ間隔(120m)→2 メッシュ間隔(60m)と 2 の累乗のメッシュ間隔で順次データ内挿を行う。最終的にはすべてのメッシュで傾斜量を計算し，最大傾斜量図を作成する。

以上の手順で接峰面図作成手法に類した最大傾斜量図が作成される。

傾斜変換線検出部の基本アルゴリズムは，前項の斜面傾斜変換線検出アルゴリズムに類似する。

①最大傾斜量図を 1/4 に縮小する。

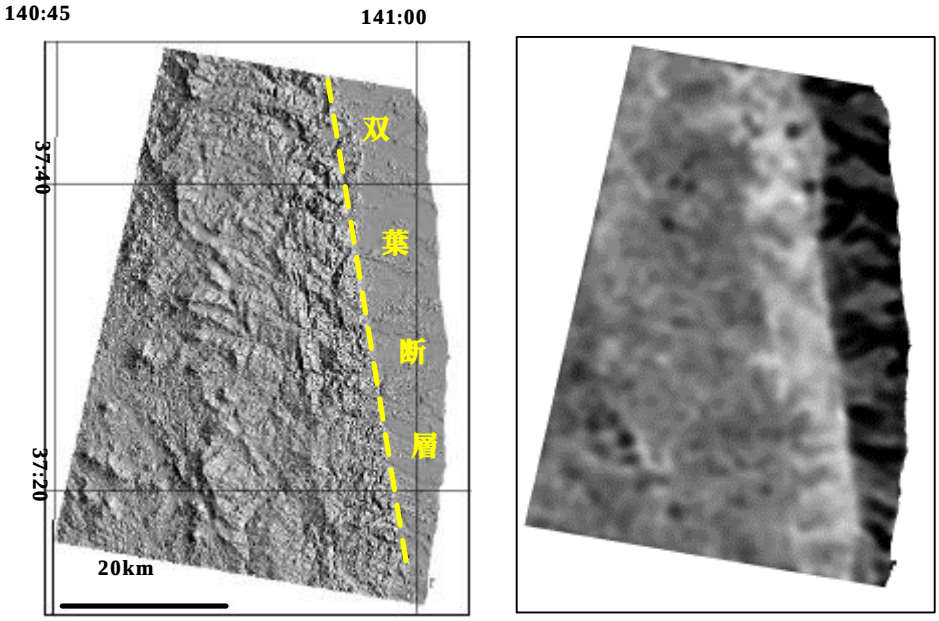
②8 方向に最大傾斜量図を 1 メッシュずらし，差分を計算する。傾斜の差分を測定しているので，ラプラシアンが計算されることになる。

③各点において 8 方向で計測したラプラシアンの最大値を記憶する。このとき負のラプラシアン(凸地形)は除外する。

④上の作業で作成したラスタデータを方向検出オペレータによりベクタ化を行う。また，ベクタ化したデータの STA による連結を行い，2 本以上連結されたデータを線素情報として出力する。

(a)陰影図　ASTER DEM

(b)最大傾斜量図



(c)最大傾斜量図のラプラシアン

(d)山地・平野直線状境界の検出結果

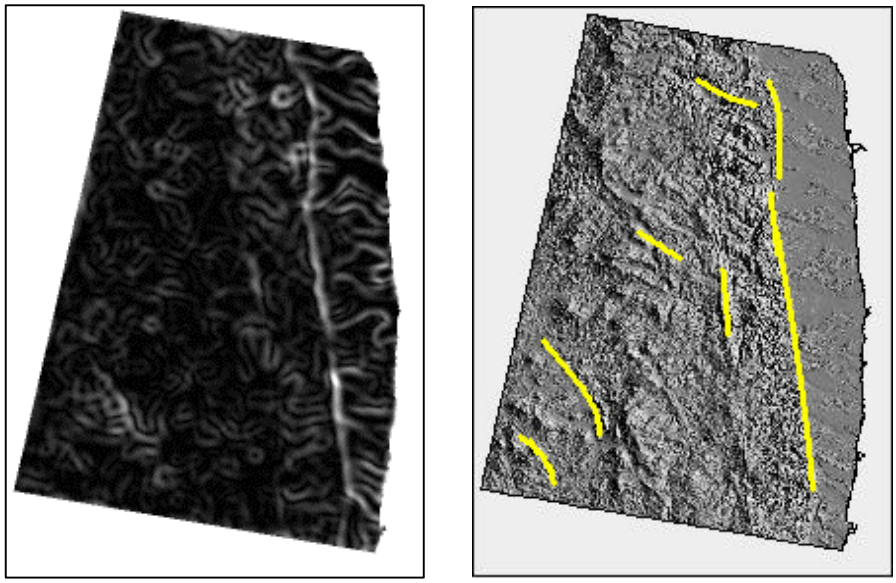


図 2.14　山地・平野直線状境界検出過程

2.7　STA による線素連結

以上の 3 つの方法で抽出した線素を，Koike *et al.*,(1998)による STA(Segment Tracing Algorithm)に類したアルゴリズムで線素の連結を行った。STA は線素の末端から扇形の検索範囲を設定し，連結する線素が同一線とみなせるかを判定するものである(図 2.15)。ここでは，検索距離を地域・方位別に変化させ，構造が発達する方向ではより遠くまで(同じ地形変化となる距離まで)検索することによって，構造を細部に反映させるものとした。なお，検索距離は連結元の線素長に応じて変化させ，長い線素ではより遠い距離まで検索するものとした。2 つ以上の線素が連続された場合には，これらを 1 つの線素として扱い，検索を繰り返すことで線素を成長させていく。連結すべき線素が無くなった状態で，線素の連結を終了させる。この操作をグルーピングと呼ぶ。

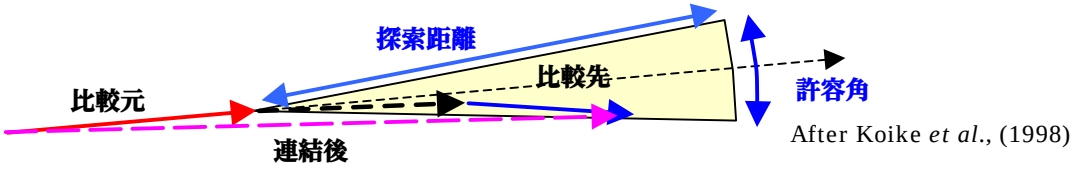


図 2.15　線素連結方法　STA 法（Segments Tracing Algorithm）

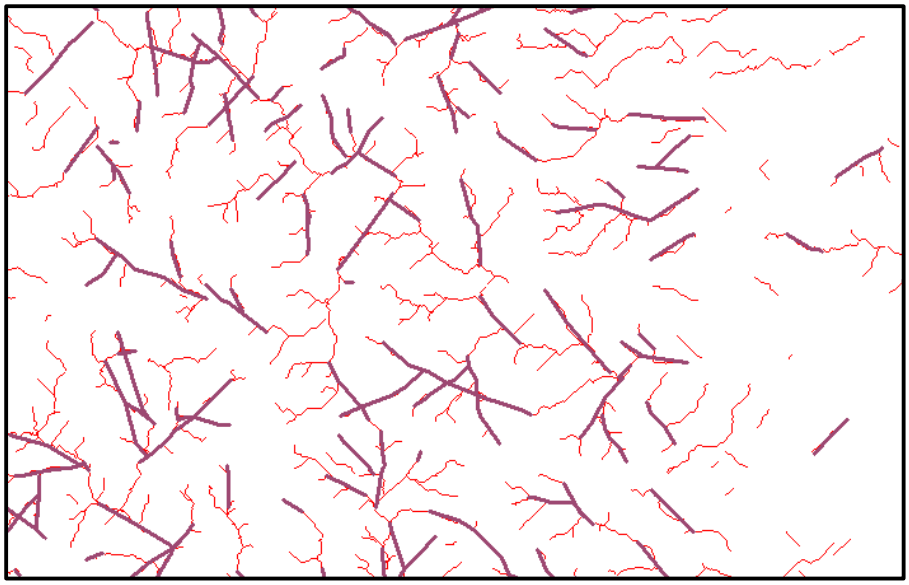


図 2.16　STA による線素連結の初期状態

図 2.16 は STA を利用した線素連結は開始後の状態であり，比較的近い線素同士が連結されている。線素連結を繰り返すことによって線素は成長することから，より遠く離れた線素同士を連結する。

STA のアルゴリズムは以下である。

［2 線素の連結］

①直線に切断された流路情報すべてを読み込む。通常，10km 四方程度の範囲では数千～数万件のベクタ情報となる。

②すべてのベクタ情報について左上が始点となるように，始点・終点の交換を行う。

③1 つ目のベクタ情報を比較元ベクトルとし，終点から扇形の検索範囲を設定する。扇形領域の頂角を 12.5°，検索基本長を比較元ベクトル長とする。ただし比較元ベクトル長が 5 メッシュ以下の場合は 5 メッシュとする。検索長は検索基本長×構造パラメータとする。ただし，検索長の上限は 12 メッシュ(600m)とする。

④残りすべての線素を比較先ベクトルとし，これらの始点が扇形領域内にある場合について以下の条件により連結の判断を行う。

⑤連結元と連結先ベクトルがなす角を内積によって算出する。このときの許容振れ角±12.5°とする。

⑥以上の条件を満たす比較先ベクトルは，扇形領域内に複数存在する場合がある。この場合には 2 線素がより近いものを連結するものとする。

⑦連結したベクトルは連結したグループ ID を与え，連結された状態であることを明示する。なお，比較元ベクトルにすでにグループ ID が与えられていれば(連結済みであれば)，同じ ID を連結先に与える。

⑧次のベクトル情報を比較元ベクトルとして，③～⑦の作業を繰り返しすべてのベクトル対について連結を実施する。

［グループ情報の整理］

①グループ ID が同一の線素を検索し，グループとしてまとめられた端点の情報を得る。

②成長したグループを比較元として，線素を比較先として前項の③～⑧の作業を繰り返し，成長したグループに連結される線素データを検索する。

③グループに連結される線素にグループ ID を与える。

④グループ番号が与えられた線素について①～③を繰り返す。

⑤新たに連結される線素が無くなった状態を連結終了状態とする。

なお，検索距離については使用する DEM の空間分解能に依存するため，適宜変更が必要である。

2.8　グループのスコアリング

以上の様にして地形特徴から算出した線素を連結・成長させた結果，対象地域では長短含めて約 3,000 本のグループ(リニアメントの候補)が抽出される。これらリニアメントの候補についてそれぞれ以下の項目についてスコアを算出する。

①地形特徴：リニアメントの候補毎に，リニアメントの直交方向のラプラシアンを計測し，候補全体の平均値・分散を計算する。リニアメントの候補毎にについて標準偏差 0.5 刻みで 1～6(数値が大きいと谷が深い)のスコアを与える。なお，傾斜変換線や山地・平野直線境界は平均値となる 3 を与える。

②グループ方位：方位別の構造特性値を 0.2 刻みに分類し，1～6(数字が大きいと強い構造規制のある方向，1 は通常主構造と直交する方向)でスコアを与える。

③グループ長：リニアメントの候補の長さを計算し，平均長を算出する。平均的な長さを 3 として，標準偏差 0.5 刻みで分類し，1～6(数字が大きいと長い)でスコアを与える。

④線素構成比：グループを構成する線素長を合計し，グループ長に占める構成比を計算する。スコアは構成比 0.6 以上(線素合計長がグループ長の 60%以上)を 6 とし，以下 0.1 刻みで 1～6 のスコアを与える。

⑤グループ長が平均値の半分以下であるグループは，必要長に達していないものとし，スコア計算から除外する。

上の①～④は各項目内における重みであるため，項目間の重みを加える必要がある。これは判読する場合の判断基準に相当するものであり，様々な地域に適用させ重みを調整する必要がある。ここでは算出した前項の 4 項目のうち，線素構成比とグループ長に重み 1.5 を乗じ，これ以外を 1.0 としてスコアの集計を行った。

2.9　リニアメントの抽出

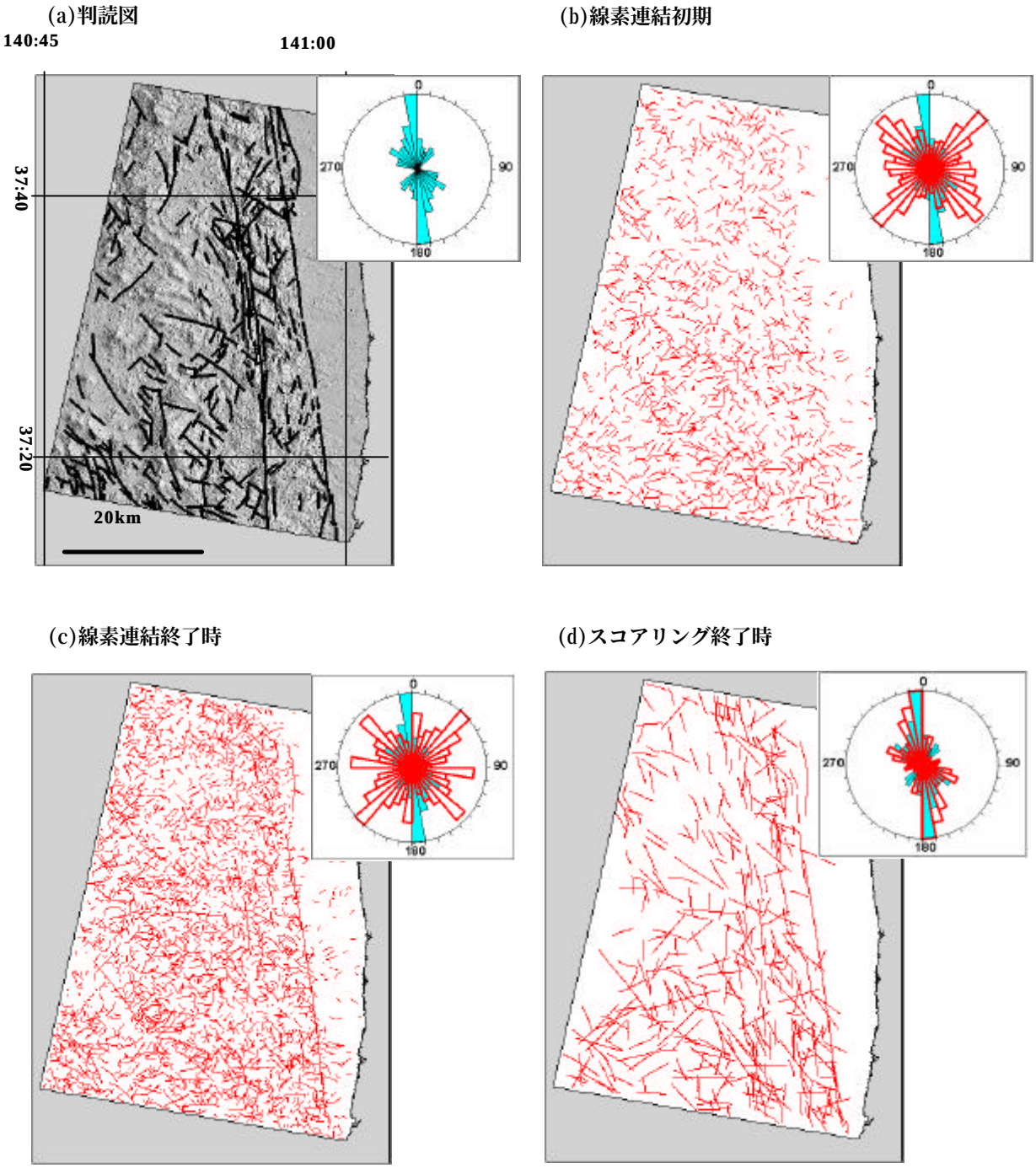
次にリニアメントの候補総数の約 1/10 が抽出される閾値を決定し，グループの篩い分けを行う。この閾値についても，前項で述べた項目間を調整する重みと同様に適用地域を増やすことで，統一した値とする必要がある。

リニアメントの抽出ステップ毎に線素やグループおよびリニアメントの抽出状況を図 2.17(b)～(d)に示した。

(a)は判読結果であり，N-S 方向のリニアメントが卓越している。(b)は 2 次以上の流路から線素を連結した STA の初期段階であり，特に線素の卓越方向は見られない。(c)は(b)に傾斜変換線および山地/平野直線境界を加え，STA の繰り返し計算で成長させ，さらに 1 次流路を追加した状態である。前段階に比較すると E-W 方向のグループが減少している。この状態で各グループのスコアを計算し，閾値でグループを篩い分けると(d)が得られる。スコアリング後のリニアメントの抽出結果は，判読結果と良い一致を示し，また構造の卓越方向もほぼ一致している。

項目別のスコアとリニアメントの候補の方向特性を見比べると，方向スコア以外の 3 つでは構造の卓越方向である N-S 方向は必ずしも最も高いスコアを得ているわけではない。ただし，確実度の高いリニアメント，すなわち，谷が深く，長く，線素構成比が高く，かつ，主構造方向に沿ったグループの多くは，判読したリニアメントと対応している。

なお，2.2 項で述べた地形構造特性を数量化せずに線素を連結し，スコアリングを行ってリニアメントを抽出すると図 2.18(c)のような結果となり，地形構造特性を考慮した場合や判読結果の構造特性とは大きく異なった結果となる。以上のように，リニアメントの抽出には地形構造特性を考慮するアルゴリズムが重要であることがわかる。



上段　判読したリニアメント(黒線)および連結した線素と抽出したリニアメント 赤）
下段　リニアメントおよび連結した線素のローズダイアグラム
水色は判読したリニアメント

図 2.17　リニアメント抽出過程と各ステップでのローズダイアグラム

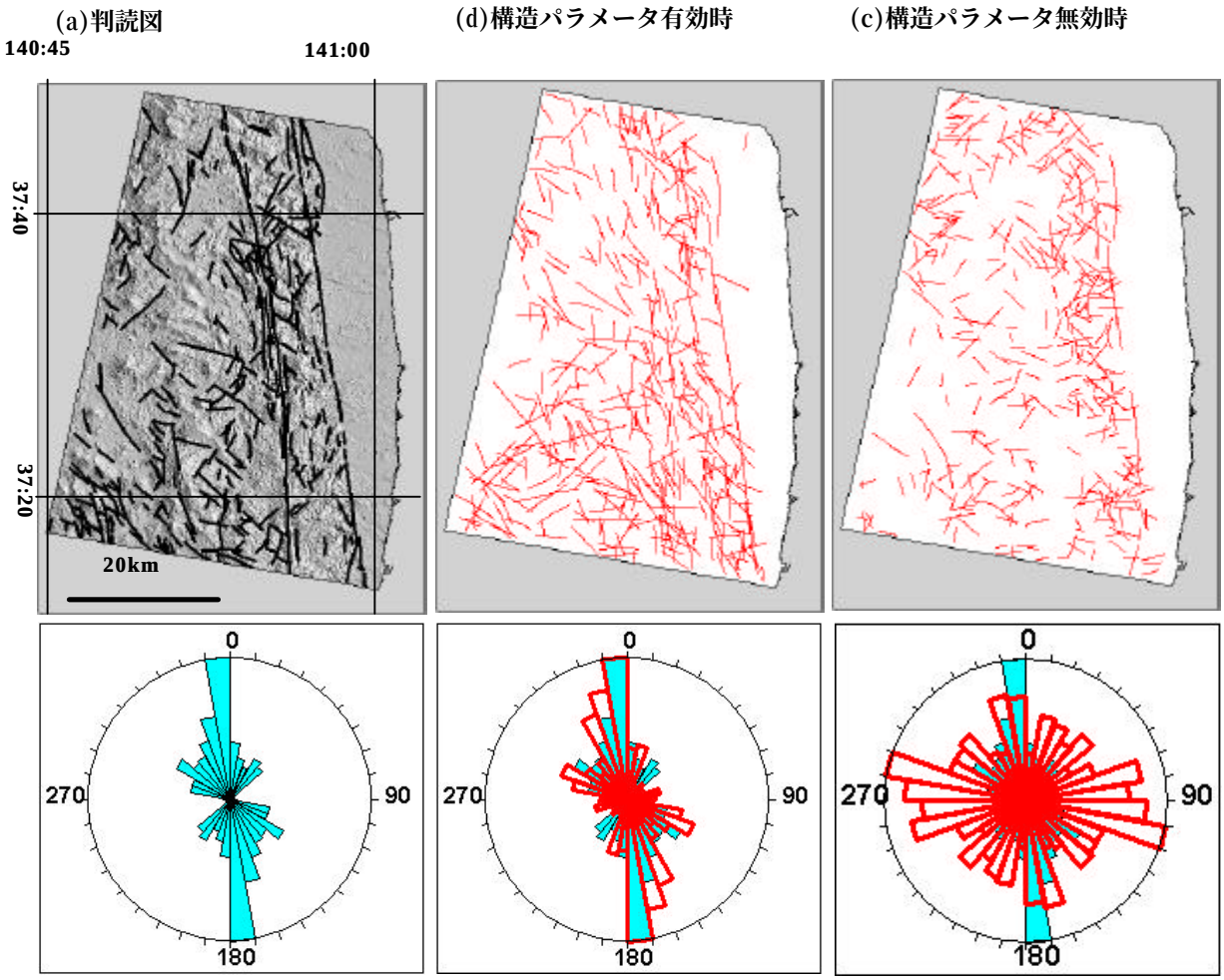


図 2.18　構造パラメータの効果

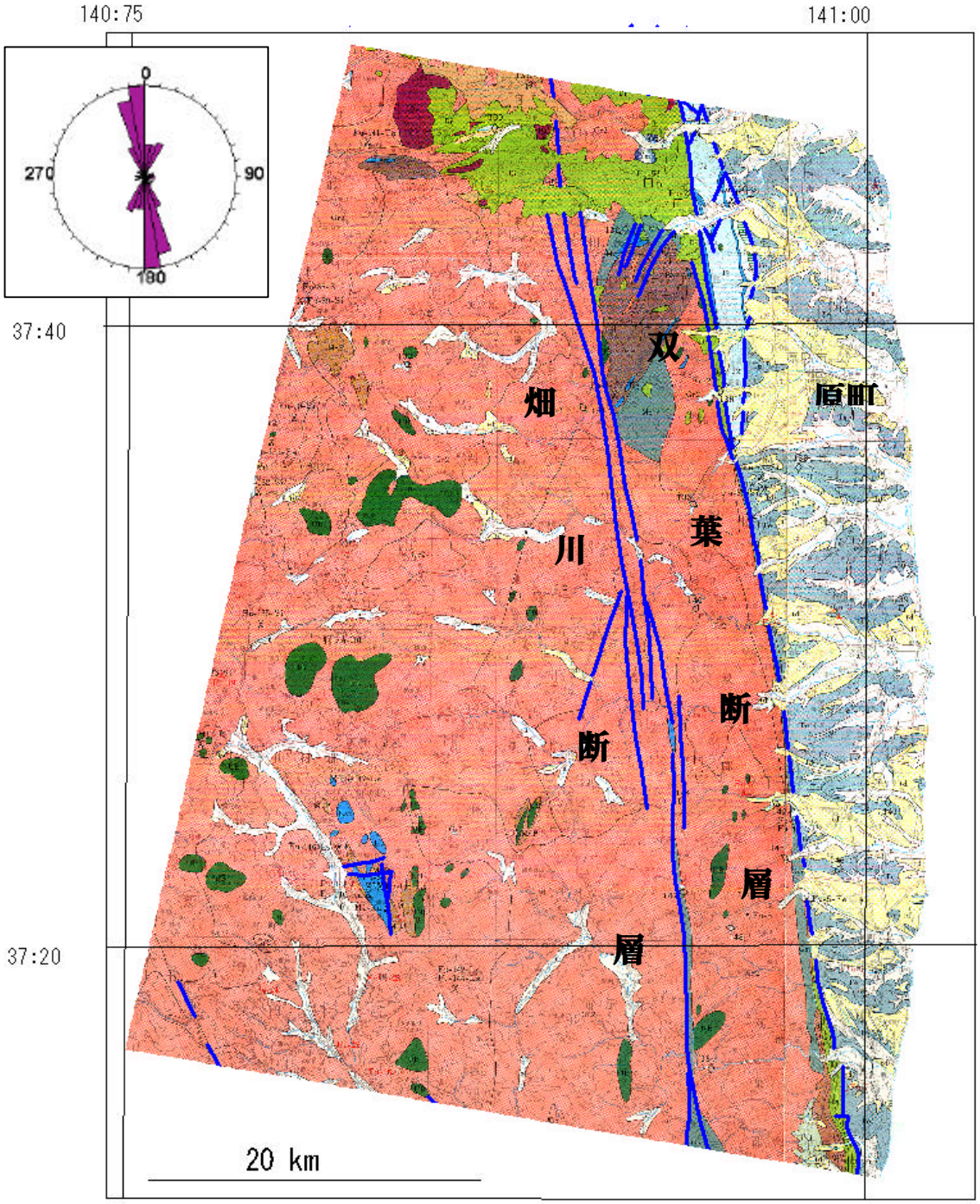


図 2.19 試験地域の地質図 (東北地方土木地質図編纂委員会,1988)

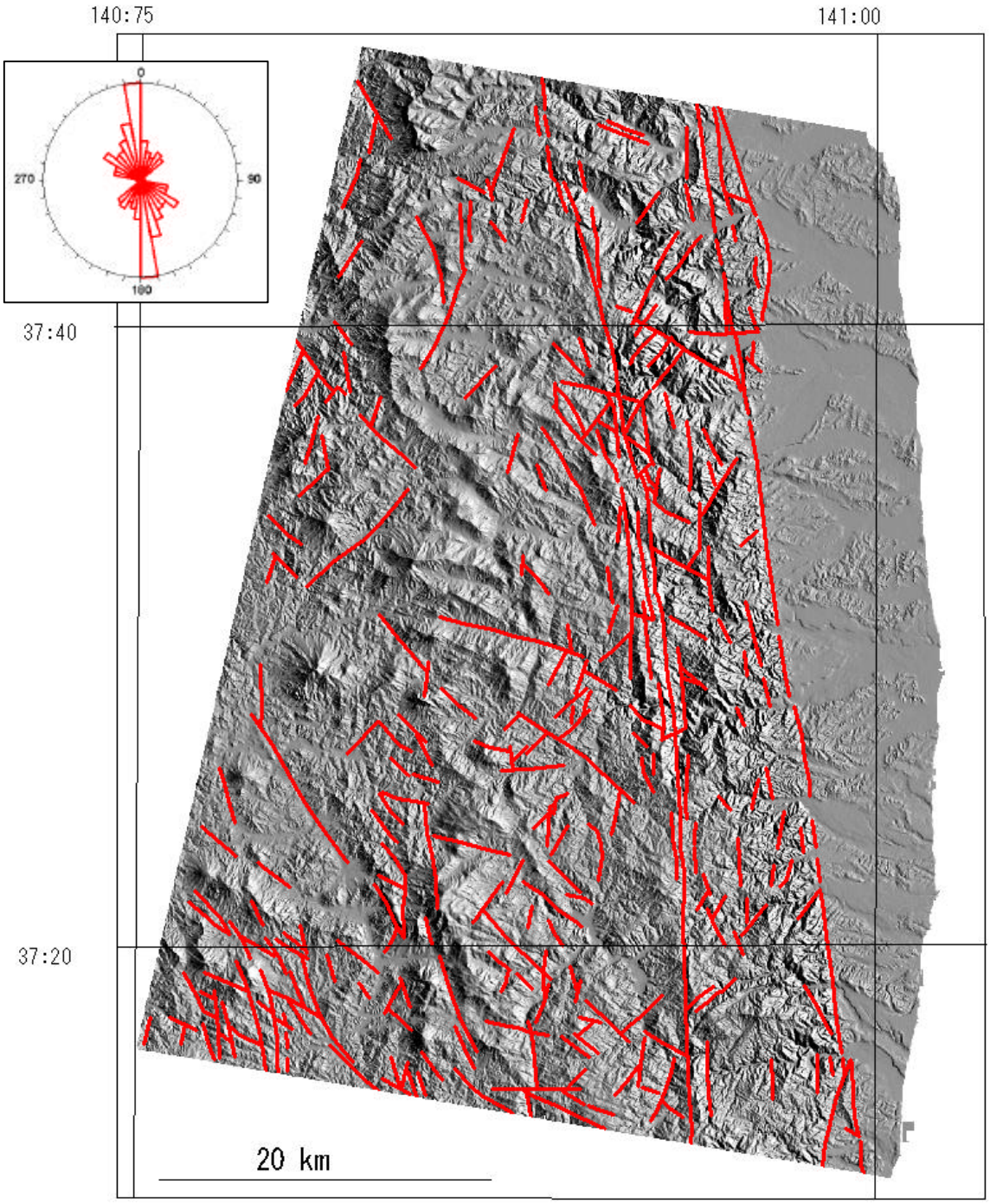


図 2.20　陰影図から判読したリニアメント分布図

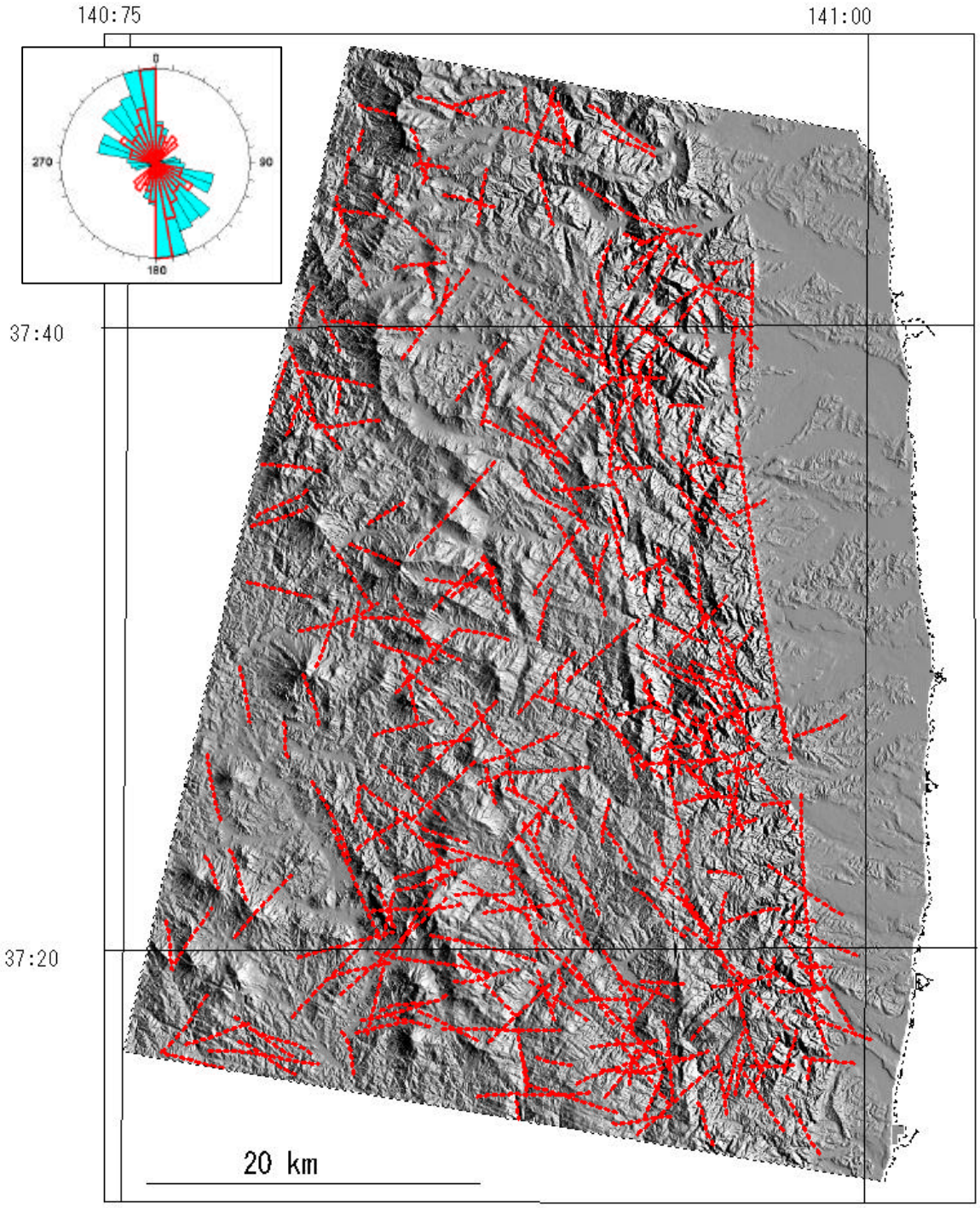


図 2.21　自動抽出したリニアメント分布図（50mDEM）

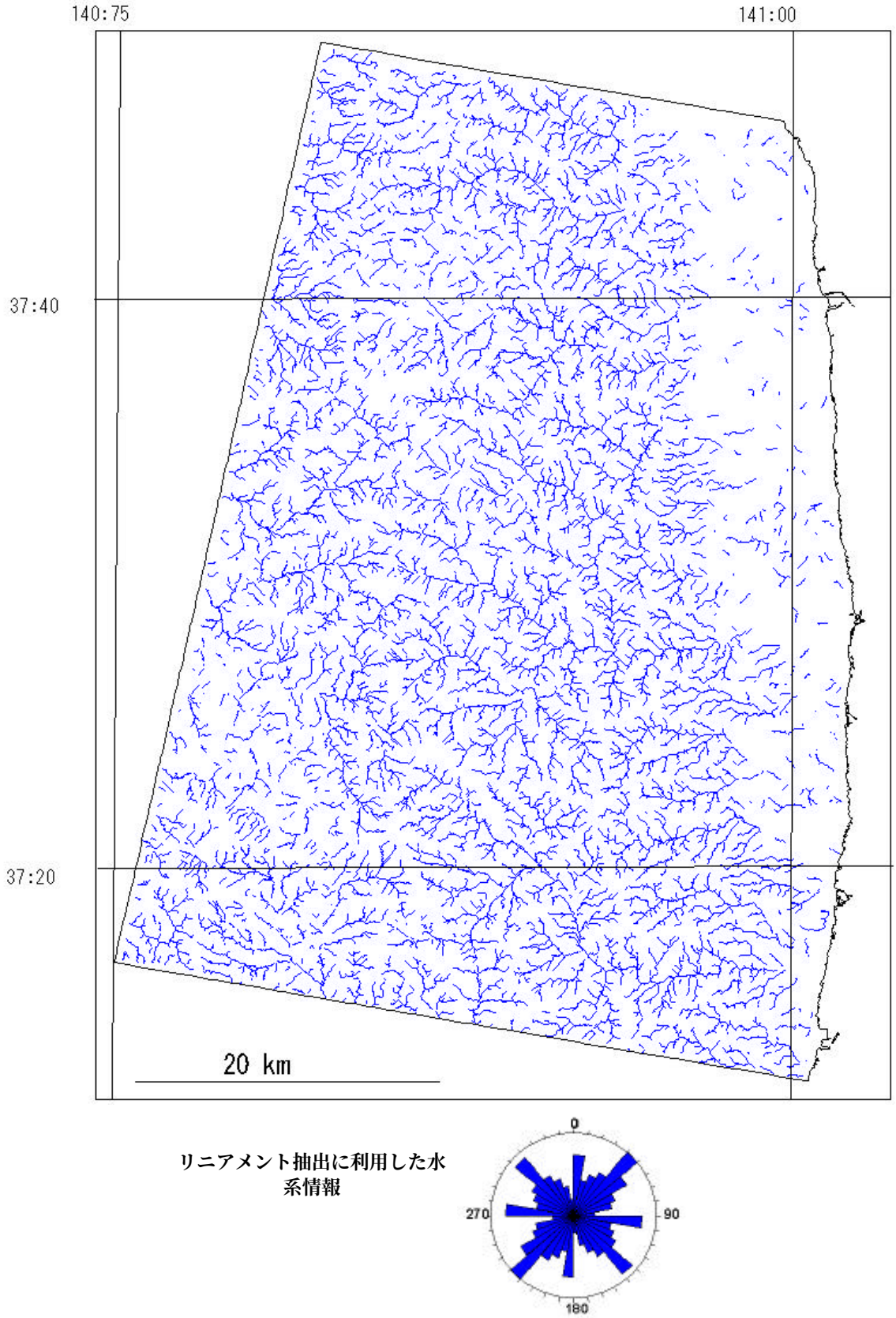


図 2.22　リニアメント抽出に利用した水系情報

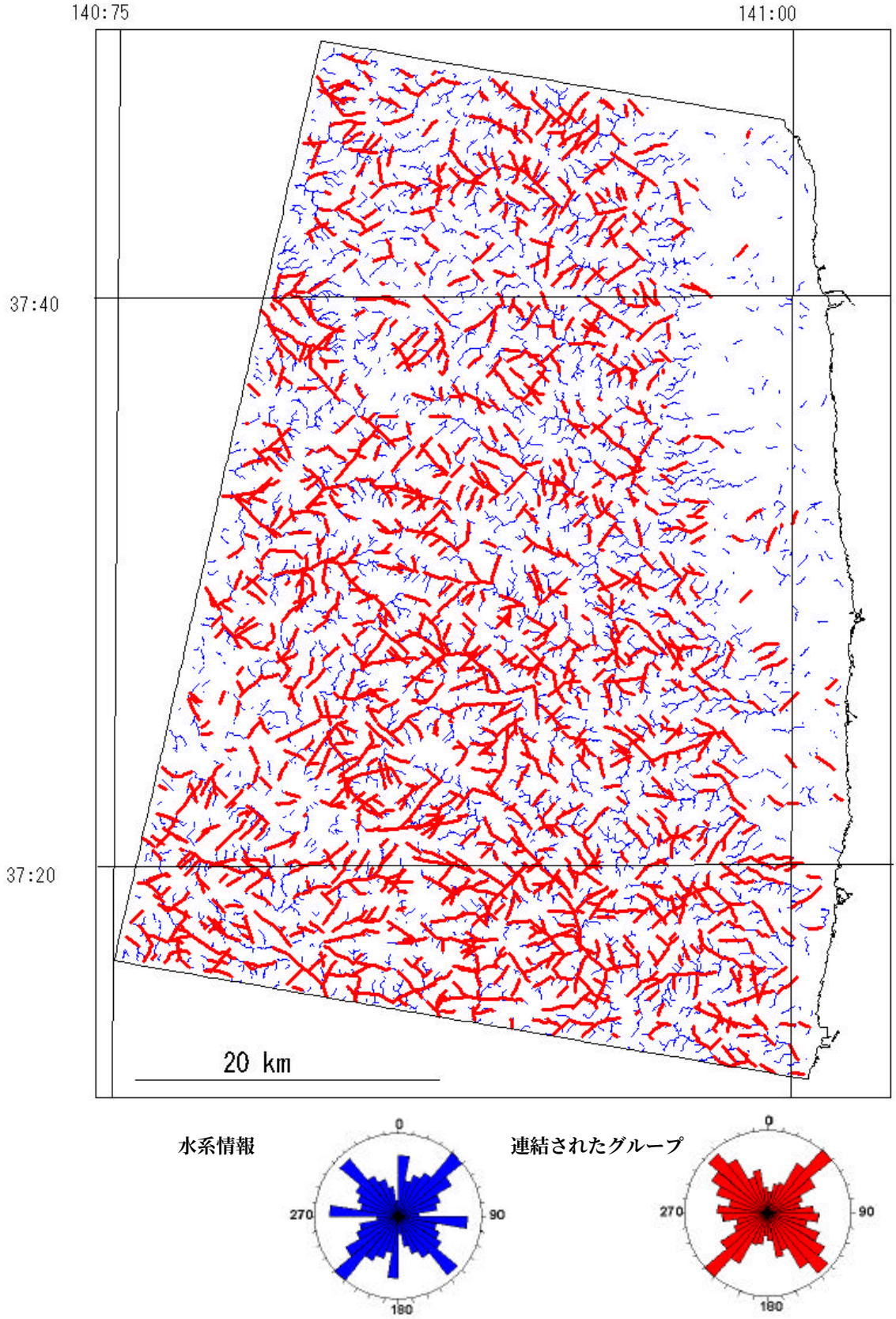


図 2.23 STA 法による線素連結初期

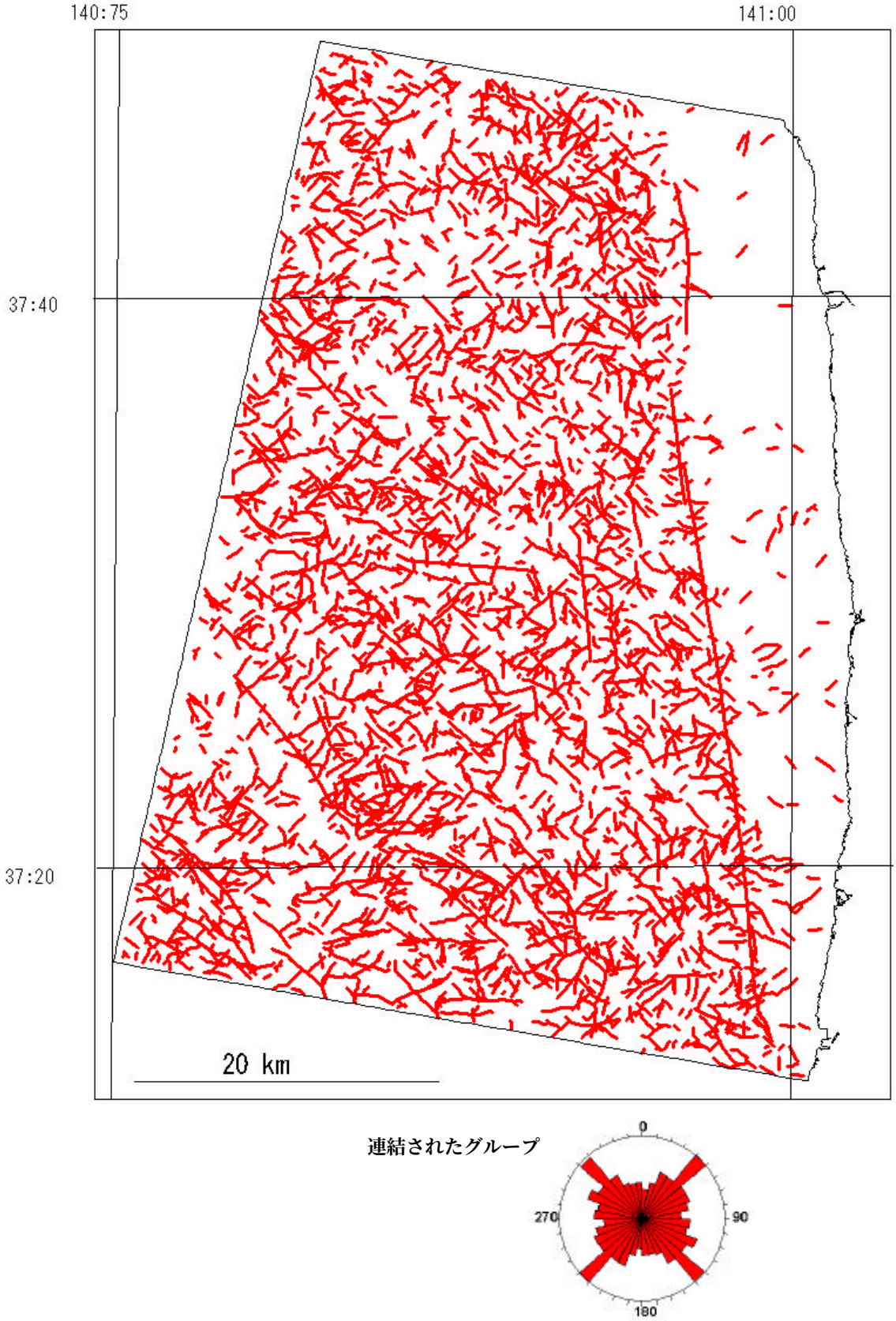


図 2.24　STA 法による線素連結終了状態

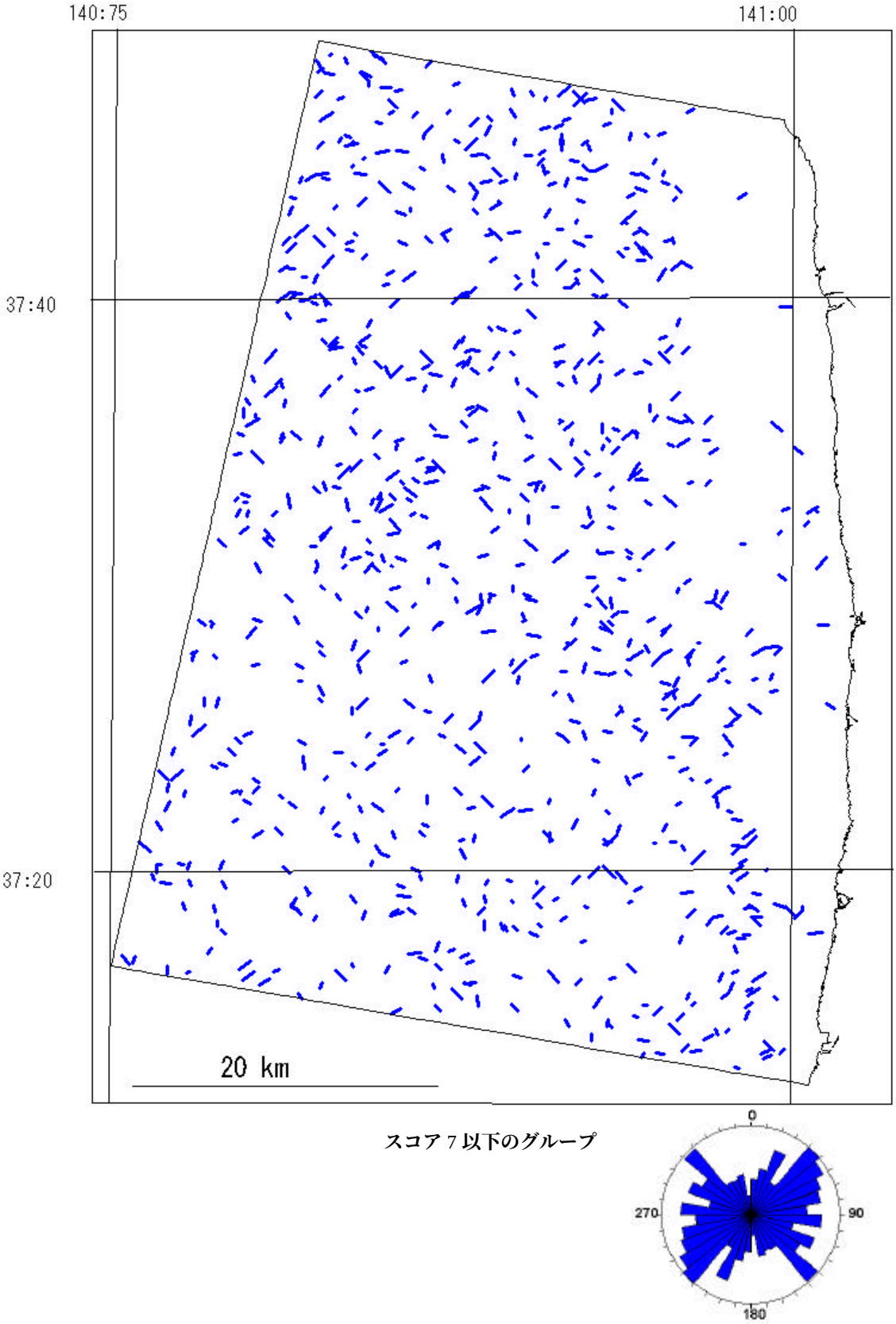
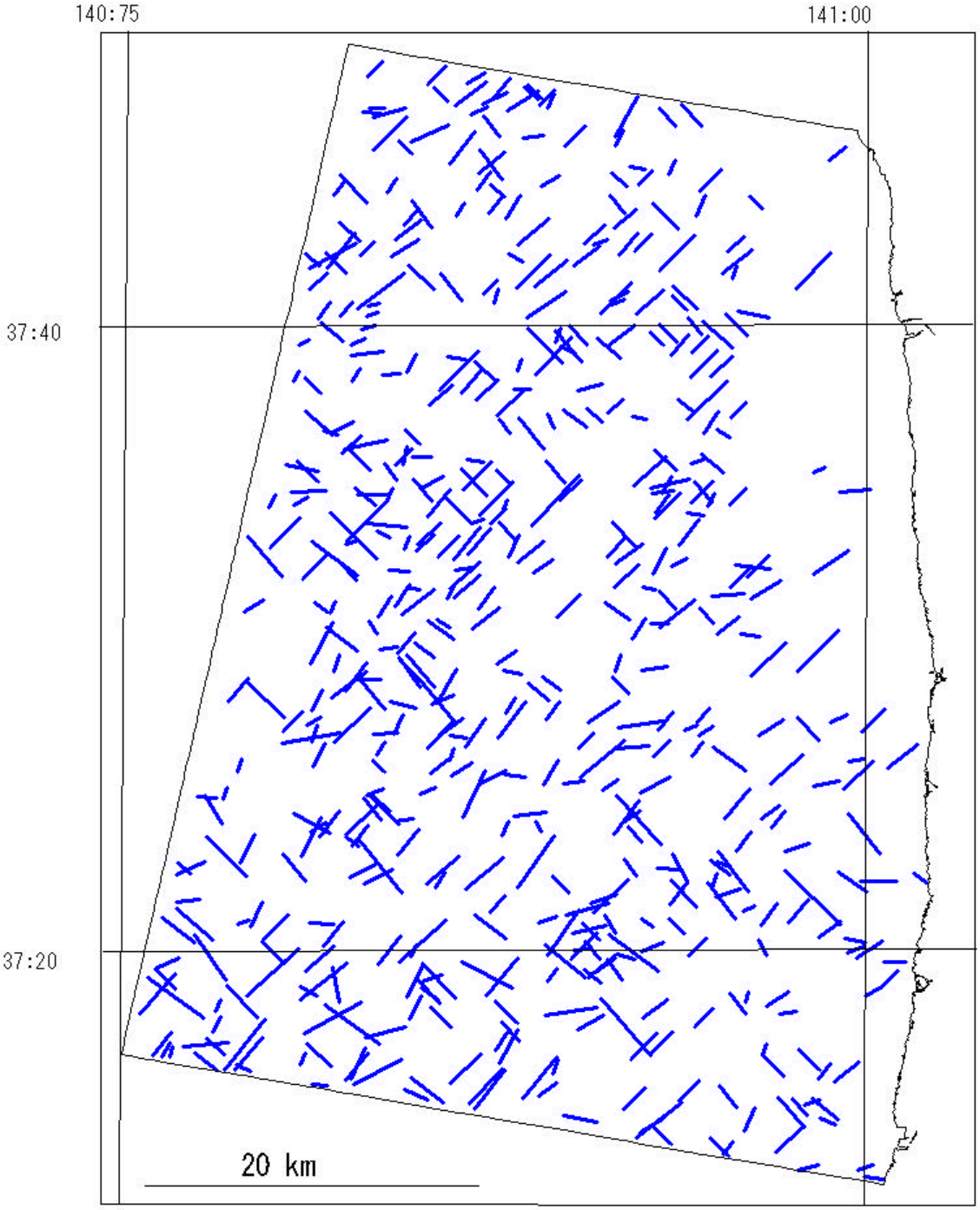


図 2.25　スコア 7 以下のグループ



スコア 8-13 のグループ

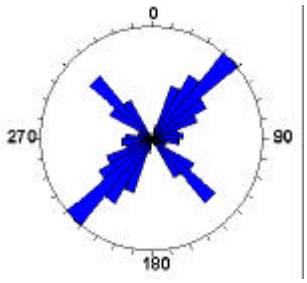
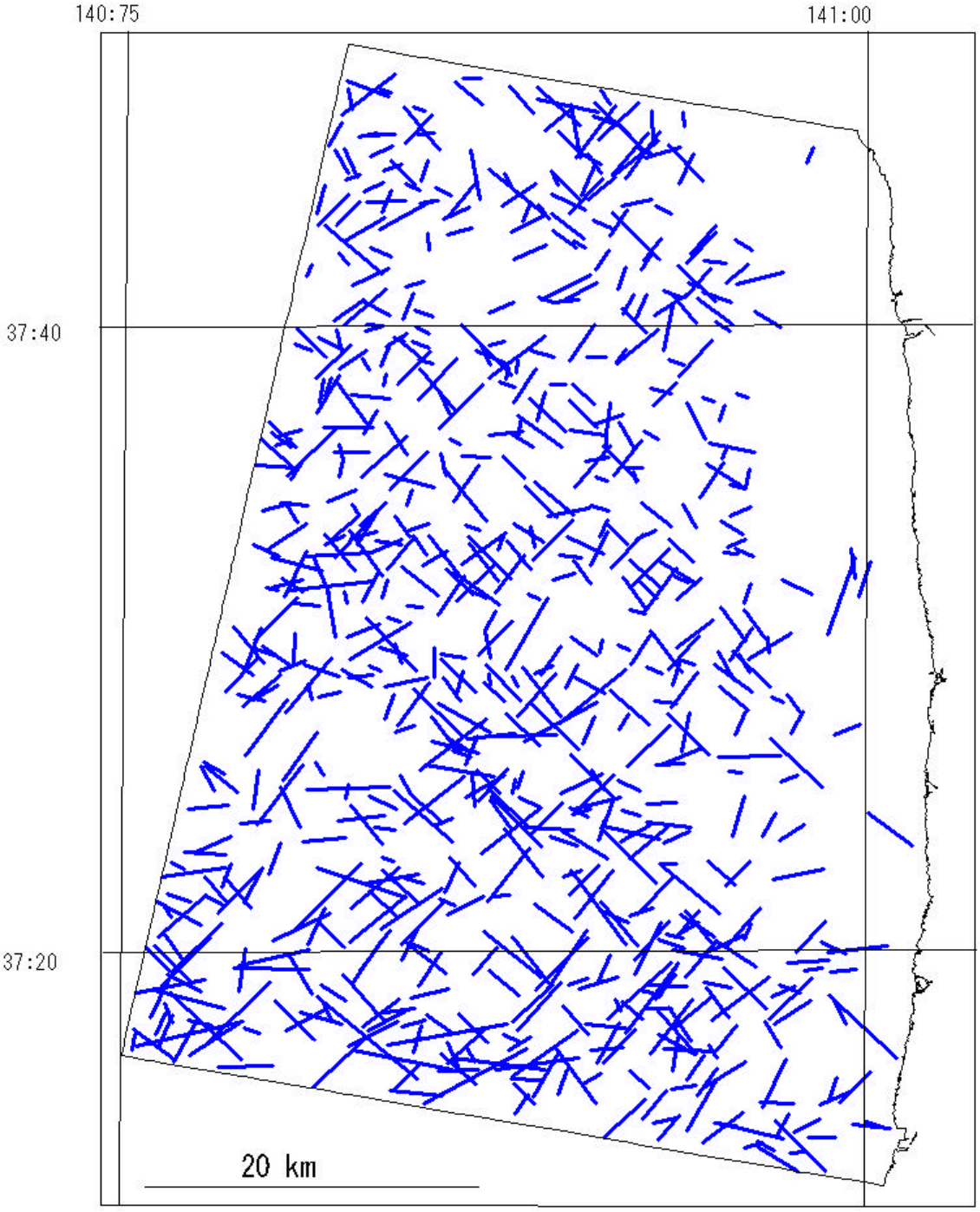


図 2.26　スコア 8～13 のグループ



スコア 14-15 のグループ

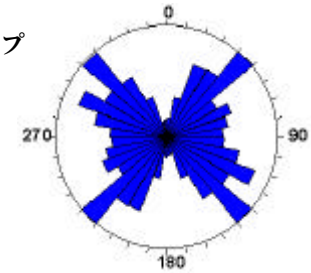


図 2.27　スコア 14～15 のグループ

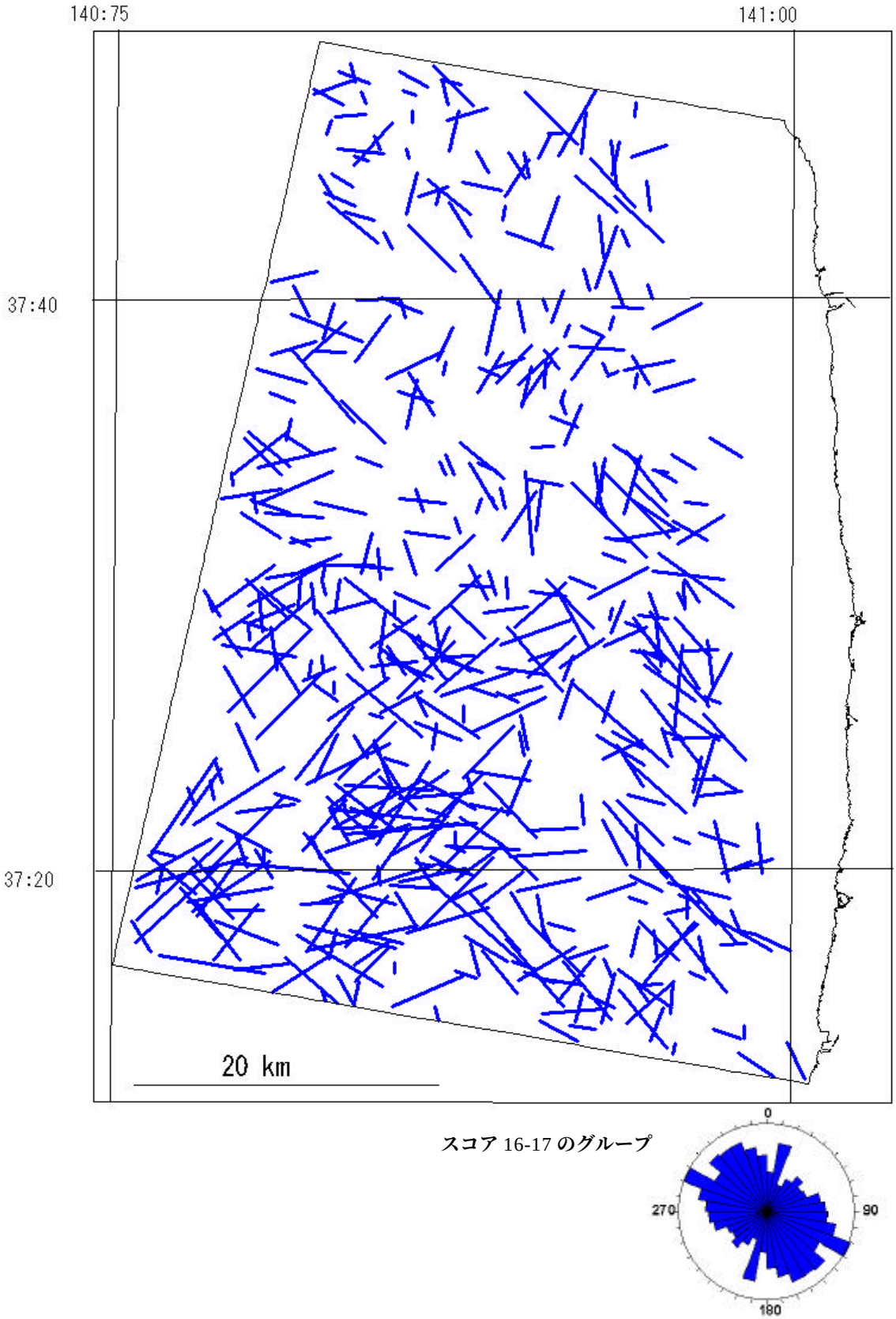


図 2.28　スコア 16～17 のグループ

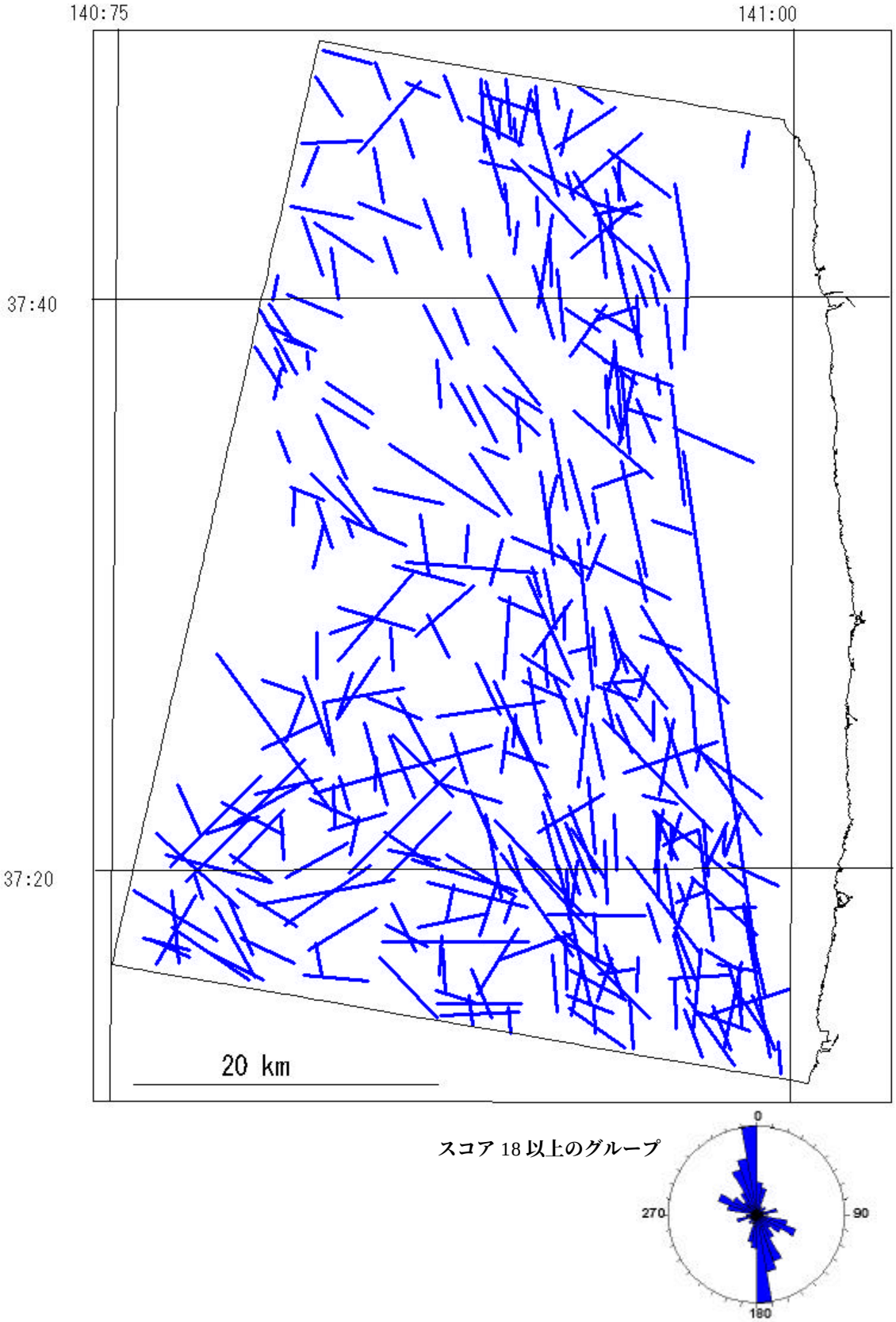


図 2.29　スコア 18 以上のグループ

2.10　リニアメントの傾斜推定方法

抽出したリニアメントは図 2.30 に示すように連結された線素群から構成される。これら線素群は位置情報と標高情報を持つ 3 次元情報である。

抽出したリニアメントを構成するこれら線素群は一直線に並ぶことは稀であり，左右に蛇行する場合が多い。このふらつきと標高との関係を調べ，標高差とともにふらつく方向が系統的に変化するのであれば，このふらつきは地表の標高変化と断裂面との交叉によってもたらされものと考えられ，断裂面の傾きが推定できる可能性がある。

ここではリニアメントの傾斜を以下の図学的な方法で推定する。

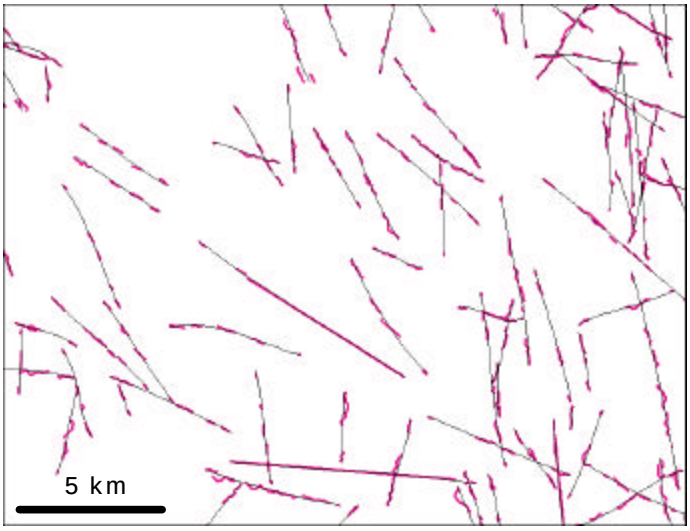


図 2.30　抽出したリニアメントの投影軸(黒)と構成線素(紫)

①抽出されたリニアメントの回帰直線を求め，この回帰直線を投影軸とする(図 2.31(a))。
②リニアメントを構成する線素の始点・終点・中間点(複数点)の位置座標と，標高値を算出する。
③各点から投影軸に下ろした垂線の距離を求め，投影軸よりも北(東)側に位置する場合を正とする。
④投影軸からの距離と標高から最小二乗法で構造の傾斜を推定する(図 2.31(b)～(d))。相関係数(R^2)が 0.5 以上であれば，ある程度信頼性があると判断し，傾斜を出力する。

リニアメントを構成する線素データからの投影断面を作成すると，抽出されたリニアメントの 80～90%では(d)の様なグラフとなり相関が認められないケースが多い。ただし，残り 10～20%のグループについては(b)や(c)の様に明瞭なトレンドを持つものが存在する。無論，このトレンドが常にリニアメントの傾斜面を表しているとは限らず，偶発的に計算されるものもある。ただし，これら傾斜が計算されたリニアメントの分布域に偏在性が認められる場合や，東西どちらか一方のみの傾斜を持つリニアメントが多い場合などでは，断

裂面の影響を受けている可能性が高いと判断する。

ここでは，傾斜が計算できるリニアメントの定義を，投影断面の相関係数(R^2)が 0.5 以上，計算される傾斜角が 45°以上として傾斜角の算出を行った。計算される傾斜角が 45°以上の条件は，以下の理由による。

既に述べたように完全に平坦な地域の流路は線素結合初期に除去されるが，やや幅の広い谷底を持つ流路情報は線素抽出に利用している。この様な地形からなる流路は多少なりとも谷底を蛇行する場合が多い。このような流路を連結したリニアメントについて投影断面を作成すると，谷底に位置していた線素は蛇行によって水平方向に広がった分布を示す。図 2.31 の(c)は傾斜が計算された例であるが，点群を眺めると中央やや左に水平に分布する点群が存在する。これら水平に広がった点群は谷底の蛇行を表しており，この部分のみで傾斜を計算すると高い相関係数を持つ傾斜 10°程度の回帰式が計算されてしまう。このケースではその他の線素の標高が大きく異なることから，谷底での蛇行による傾斜計算への影響は小さいものとなっている。これに対し，標高差が小さい線素群のみで連結されている場合には点群は水平に広がった分布となり，これら点群から算出されるリニアメントの傾斜角は明らかに誤ったものとなる。この影響を除くため，45 度以下で傾斜が計算された場合には除外するものとした。

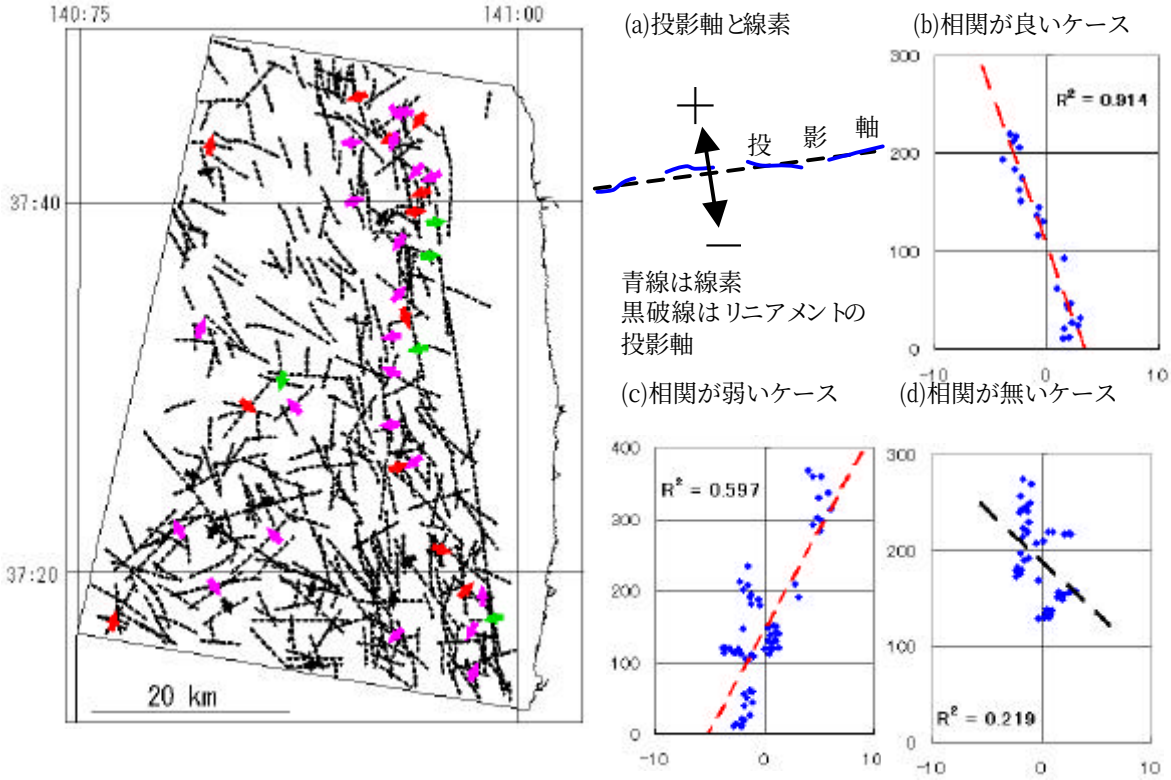


図 2.31 構成線素線素の投影断面と推定されたリニアメント傾斜

以上のアルゴリズムと定義によってリニアメントの傾斜を推定した結果を図 2.32 に示した。図中の矢印が付いたラインが傾斜角の計算されたリニアメントであり，81 本が計算されている。なお，抽出されたリニアメントの総数は 391 本であることから，約 20%について傾斜が計算されたことになる。

図中の矢印の向きは傾斜方向を，色は傾斜角を表している。計算されたリニアメントの傾斜は 70～79°が最も多い。

なお，図 2.32 に示した傾斜を持つリニアメントの分布域は，対象地域東部の双葉断層と畑川断層に挟まれた領域に集中している。また，これらの地域では N-S 系リニアメントが多いことから東西両方向の傾斜を示しているが，このうち西傾斜からなるリニアメントが多い。このような地域的偏在性や非対称的な傾斜分布は構造を反映している可能性があると言える。

2.11　シュミットネットによる比較と構造の推定

断裂系の走向と傾斜が明らかになれば，シュミットネットを利用することができる。

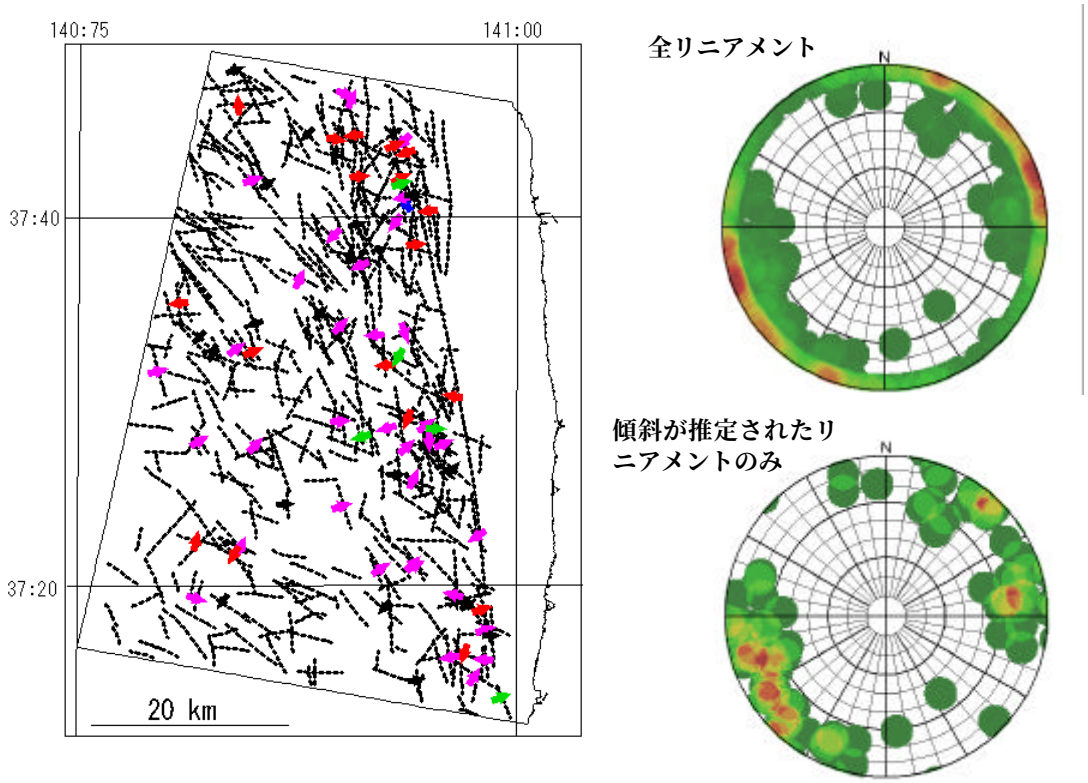


図 2.32　推定されたリニアメントのシュミットネット

図 2.32 の右上のシュミットネットは抽出されたリニアメントのシュミットネットを表した。また，下段には傾斜が計算されたリニアメントのみのシュミットネットを表した。図 2.32 のリニアメント分布を比較すると，傾斜が計算されたリニアメントは双葉断層から畑川断層に挟まれた領域に多く分布し，また，これらリニアメントの多くは西傾斜であることが解る。

双葉断層は西側の山地と東側の平野を画する地形境界を形成している。したがって，これら地形を形成するためのには，2 つのケースが考えられる。1 つは双葉断層が NE-SW の伸長応力場で形成される正断層であり，断層東側が沈降する垂直ないし東傾斜の構造であるとする考え方がある。もう 1 つは NE-SW の圧縮場で形成された逆断層であり，断層西側が隆起する西傾斜の構造であるとする考え方がある。通常の画像解析では，地形特徴からどちらが相対的に隆起したかを判断することができるが，伸張場であるか圧縮場であるかを推定することは難しい。これは断層の傾斜(構造)が不明なため判断できないことによる。

今回の解析では，双葉断層と畑川断層に挟まれる領域は西傾斜が多く，山側に傾斜する逆断層の特徴を示している。したがって，阿武隈山地東縁を形成する山塊は NE-SW 系の圧縮場の逆断層によって形成された隆起山塊であるとの推定が可能となる。

対象地域の主構造を形成する畑川破砕帯と双葉破砕帯に関しては”浪江及び磐城富岡地域の地質”(1994)に詳しい。これら 2 つの破砕帯について引用する。

(1)畑川破砕帯

畑川破砕帯は阿武隈山地東縁に沿って N 10°W 方向に約 100km にわたって連続する破砕帯である。その北方延長は鬼首‐湯沢マイロナイト帯に続くと考えられ，畑川破砕帯は延長 200km 以上に及ぶ長大な破砕帯である。本地域では数列の平行な断層とマイロナイト・カタクラサイトが顕著に発達する幅 2‐3km の帯状部として認められる。「原町及び大捧」図幅地域では，畑川破砕帯に分布する断層のうち特に発達の顕著な 3 本の断層を，畑川破砕帯西側断層・中央断層・東側断層と呼んだ。

畑川破砕帯に発達するマイロナイトの非対称小構造は，本破砕帯が左横ずれのセンスを有することを示している。この左横ずれ断層運動の活動時期は，白亜紀前期の深成活動以降，新第三紀の火山活動以前である。横ずれの変位量については 60km 程度と見積もられている。但し大槻・永広(1992)は鬼首‐湯沢マイロナイト帯を双葉破砕帯の北方延長としており，双葉破砕帯の変位量は 130km と見積っている。

断層に沿って強片状化した珪長岩や泥質・苦鉄質変成岩類がセブタ状に分布している。断層の多くはカタクラサイト形成時の変位をも被っているためか，露頭として見いだすことは困難である。破砕帯中の花崗岩質岩類には片状構造が発達し，その方位は一般に NNE‐SSW 走向で急立し，線構造はほぼ水平である。断層近傍では，この強～弱片状花崗岩質岩中に幅数 cm から数十 cm の層状のウルトラマイロナイトが見いだされる。

阿武隈山地は第三紀以降に大幅に上昇している。第三紀以降の変動については,畑川破砕帯では周囲に第三系が分布しないため双葉破砕帯ほど明瞭ではない。しかしながら畑川破砕帯のカタクラサイトを伴う断層や，畑川破砕帯の南北方向の断層を高角度で切るマイロナイト化を伴わない断層は，第三紀以降の阿武隈山地の隆起に関わる変動に関係して形成されたと考えられる。先第三紀に形成された横ずれ断層の多くは第三紀以降にも再活動し，垂直方向に変位したのであろう。変位量については，直接のデータはないが，カタクラサイト化の度合いは双葉破砕帯より弱いので，後述する双葉破砕帯の変位量と同程度かそれ以下であろう。

(2)双葉破砕帯

双葉破砕帯は畑川破砕帯の東方約 8km の地点で，それと平行に走る破砕帯である。阿武隈山地東縁を区切って南北に約 100km 連続している。畑川破砕帯と同様に数列の平行な断層とマイロナイト・カタクラサイトが顕著に発達する幅 2‐3km の帯状部である。畑川破砕帯と比べてマイロナイト化の度合いは弱く，ウルトラマイロナイトは本地域からは見いだされていない。畑川破砕帯と同様に，マイロナイトの非対称小構造から左横ずれ断層運動による形成で，その時期も畑川破砕帯とほぼ同じと考えられる。

破砕帯中の断層のうち，最も大規模なものは双葉断層と名付けられている。現在地表で見られる双葉断層は，白亜紀に生じた横ずれ剪断帯としての双葉破砕帯が，第三紀以降の造構応力場の変化に対応して西上がりの縦ずれ断層として再活動して生じたものである。

この断層は，北は宮城県岩沼市南方から，南は福島県いわき市久之浜町まで約 100km にわたって連続する大断層で，地形的には阿武隈山地とその東の海岸に沿う低平な丘陵地帯の境界となっている。現在の阿武隈山地は，主としてこの双葉断層の活動によって，阿武隈山地側が北方に傾動しながら大きく隆起した結果生まれたものである。

双葉断層の北半では，断層は先第三系と新第三系分布域の間を画し，断層面はほぼ垂直であるが，南部では断層は第三系分布域の中を走り低角な逆断層となっている。さらに,断層が海に没する南端部では断層ではなく撓曲帯として現れている。このような断層の性格の地域的な変化について，恒石(1966,1984)は，双葉断層の近傍に分布する第三系中の共役小断層の解析によってその原因を明らかにした。それによれば,共役断層系の解析から主応力軸が断層からの距離によって系統的に回転しており，このことは，双葉断層が曲面断層であること，すなわち構造的に深いところでは断層面は垂直であり，浅いところでは断層面が低角になる断層であることを示しているという。なお，Tsuneishi(1978)は模型実験によって，実際に双葉断層で見られるような曲面断層が生じることを証明している。

本地域内での双葉断層は，地域北端の浪江町室原から南端の富岡町赤木付近まで北北西に阿武隈山地の東縁を画して伸びている。

浪江町高倉の高瀬川南岸では鮮新統の向山層及び大年寺層に花崗岩類が衝上している断層露頭が見られる。断層面の走向傾斜は NS,40°W で，厚さ約 30cm の軟らかい断層粘土が認められる。花崗岩類は細片状に破砕されて黒色ないし暗灰色を呈し，鮮新統は引きずられてほぼ直立している。また，鮮新統中には主断層から分岐したと見られる，より低角な断層が認められる。これより南では,双葉断層の断層面は次第に西傾斜の低角に変化する。

大熊町大川原から富岡町赤木までは，双葉断層は白水層群と大年寺層を画する低角逆断層となっている。

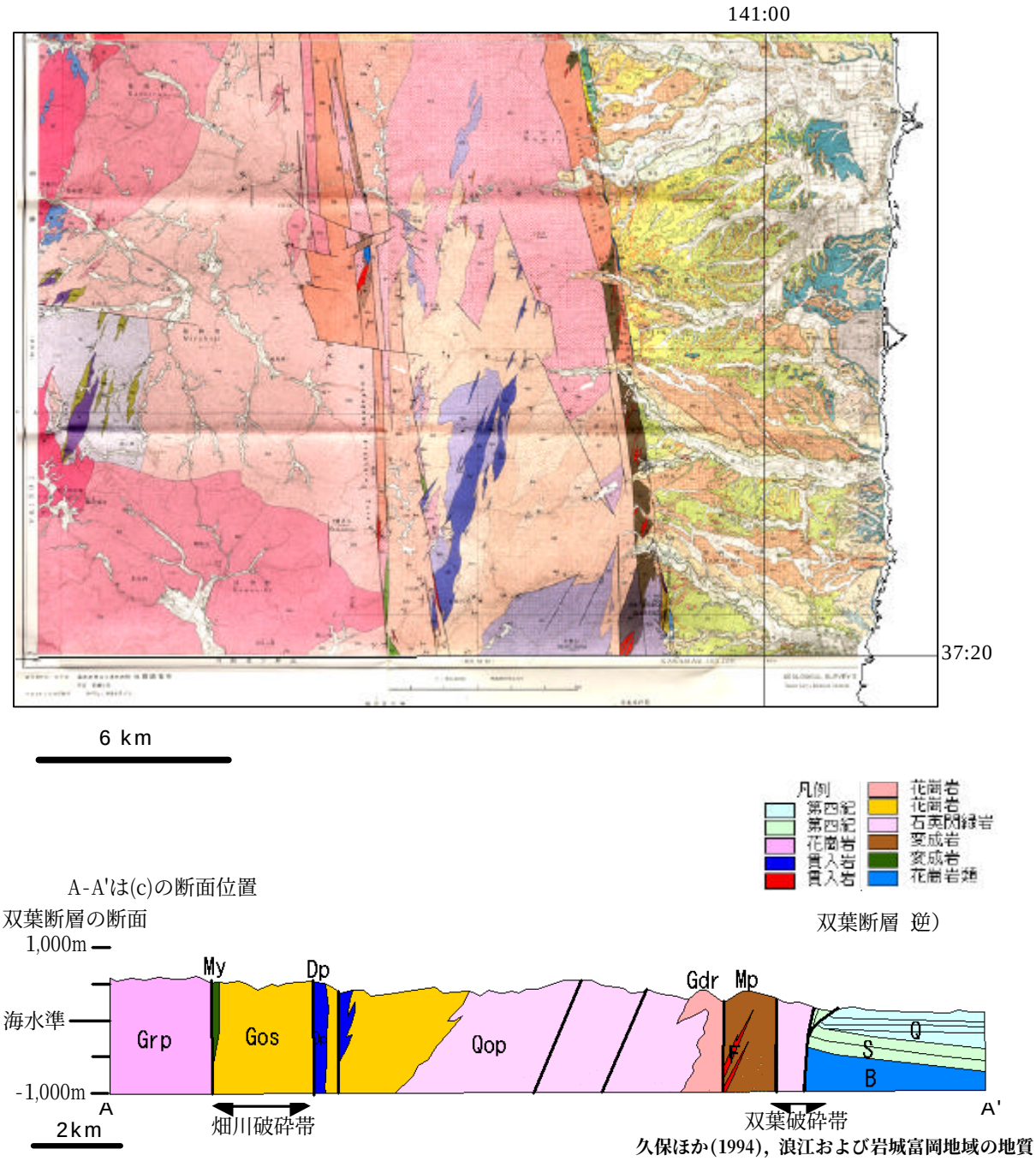
双葉断層の西約 120‐180m 離れて，これに平行する東上がりの断層が並走している。断層面は直接確認できないが，大川原と富岡町大木戸川原では先第三系が繰り返すこと，また赤木北方では先第三系と浅貝層が繰り返して露出することから，この断層が推定される。この断層は，三田(1951)及ぴ須貝ほか(1957)の大木戸川原逆断層に一部が一致し,おそらく双葉断層に共役の逆断層と考えてよい。

これら構造について要約すると，畑川破砕帯，双葉破砕帯は白亜紀に形成された左横ずれの剪断構造であり，形成時期はほぼ同時期と考えられている。断層付近では圧砕されたマイロナイトやカタクラサイトが形成されている。これら破砕帯は，第三紀以降応力場の変化により両破砕帯とも阿武隈山地を隆起させる構造運動に変化し，双葉断層北部では垂直に近い，南部では西傾斜の逆断層構造を形成したと考えられている。

なお，"新編　日本の活断層"では，双葉断層のうち原町以北について横ずれ成分を持つ西上がりの活断層としている。

図 2.33 は，縮尺 1/50,000 地質図幅　浪江及び磐城富岡地域の地質(久保ほか,1994)に記載されている双葉断層南部の地質断面である。前述した様に双葉断層の浅部は西傾斜の低角逆断層であり，深部では傾斜が急角度に変化している。ただし，畑川破砕帯では垂直の断層と記載されている。なお，畑川断層と双葉断層の間には花崗岩を切る西傾斜の断層が記載されている。

これらの特徴は図 2.32 に示したリニアメントの構造解析結果の解釈と整合的であり，DEM から抽出したリニアメントの屈曲から構造推定が可能であることを示している。ただし，畑側破砕帯と双葉断層に挟まれた区間では西傾斜の変成岩や貫入岩が分布し，これらの境界をリニアメントとして認識し，西傾斜と計算した可能性もある。



久保ほか(1994)，浪江および岩城富岡地域の地質

図 2.33 双葉断層南部の地質図・地質断面図

2.12　解析パラメータの検討が必要な項目

以上述べたように，リニアメントの自動抽出はDEMから算出される地形特徴量を利用することから，明確な定義で抽出することができる。ただし，これまで示したようにいくつかのパラメータ設定が必要となる。これらパラメータはDEMの空間分解能だけに依存するものもあるが，グループの篩い分け等，判読結果と比較しながら決定せざるを得ないものもある。

以下に検討の必要なパラメータを示した。なお，太字はリニアメント抽出結果に比較的大きな影響を及ぼす重要なパラメータを示す。

(1)傾斜変換線の検出とベクタライズ

①傾斜変換線の異常域の閾値

Defaultでは平均値+0.5σ，あるいは一定の閾値

②ラプラシアン異常の方向検出オペレータのサイズ

24，36，48メッシュなど(Defaultでは48メッシュ，480m)

③方向検出オペレータの重複領域

Defaultでは50%づつ重複

④異常域の線認識　スリット内に含まれるラプラシアン異常域点数

Defaultでは方向検出オペレータで決定した方向に含まれる異常域を全領域で計算し，その平均値を閾値とする。

⑤オペレータで認識した線素連結時の許容角，検索距離の上限

Defaultでは許容角15°，72メッシュ(720m)

(2)山地/平野直線境界

①最大傾斜量図作成時のメッシュサイズ

Defaultでは500m

②方位検出オペレータによるラプラシアン検出ウィンドウサイズ

Defaultでは30メッシュ(1/4に縮小しているので1,200m四方)

③方向検出オペレータの重複領域

Defaultでは50%づつ重複

④異常域の線認識

Default　では方向検出オペレータで決定した方向に直交する方向でラプラシアンを計測し，閾値によって線素を認識差させる。Default　1.5

⑤オペレータで認識した線素連結時の許容角，検索距離の上限

Defaultでは許容角20°，60メッシュ(60×40m=2,400m)

(3)線素連結

①検索距離の上限

Default では 60 メッシュ(600m)

②ふらつき具合

連結先線素の連結元線素延長上からの乖離距離(扇形検索範囲の頂部付近で影響する)

Default は 6 メッシュ(860m)

③許容角

検索領域の頂角　Default では 12.5°

(4)グループのスコアリング

①グループ長の下限

線素を連結したグループ長の下限　Default　300m

②グループ直交方向の谷の深さ

現在は平均値が 3，0.5σ毎にスコアを変化　→　定数化が必要

③グループ長

現在は平均値が 3,平均長×0.5 刻みでスコアを変化　→　定数化が必要

④グループ方位

現在は構造の数量化の数値を 0.2 刻みでスコアを変化

⑤線素構成比

現在は，0.1(10%)刻みでスコアを変化，0.6 が上限

⑥項目間の重み

Default では，グループ長と線素構成比が 1.5 倍，その他 2 つは 1.0 倍で集計

⑦グループを篩い分ける閾値

全グループ数の獲得スコアの上位 10%を選別　→　②～⑥が定数化できれば閾値の定数化が可能。この場合には異なる地域との直接の比較が可能

以上のように，パラメータや閾値には試行錯誤によって決定しているものが少なくない。このうち検索距離やウィンドウサイズなど 1 地域の解析を実施すればほぼ定数化できるパラメータもあるが，スコアリングパラメータのようにいくつかの地域から，決定しなければならない数値もある。

３．10m メッシュ DEM による幌延地域のリニアメント解析

前章で述べた手順によって，幌延地域のリニアメント自動抽出を実施した。

3.1　利用したデータと解析地域

この解析では，貴機構から貸与された縮尺 1:25,000 地形図 12 図幅(表 3.1)に相当する DEM のうち，幌延町東部に位置する大曲断層を含んだ「本流」,「安牛」図幅に相当する東西約 10km，南北約 18km の範囲を対象とした(図 3.1 および図 3.2)。

表 3.1　使用したデータの図幅名(縮尺 1:25,000)

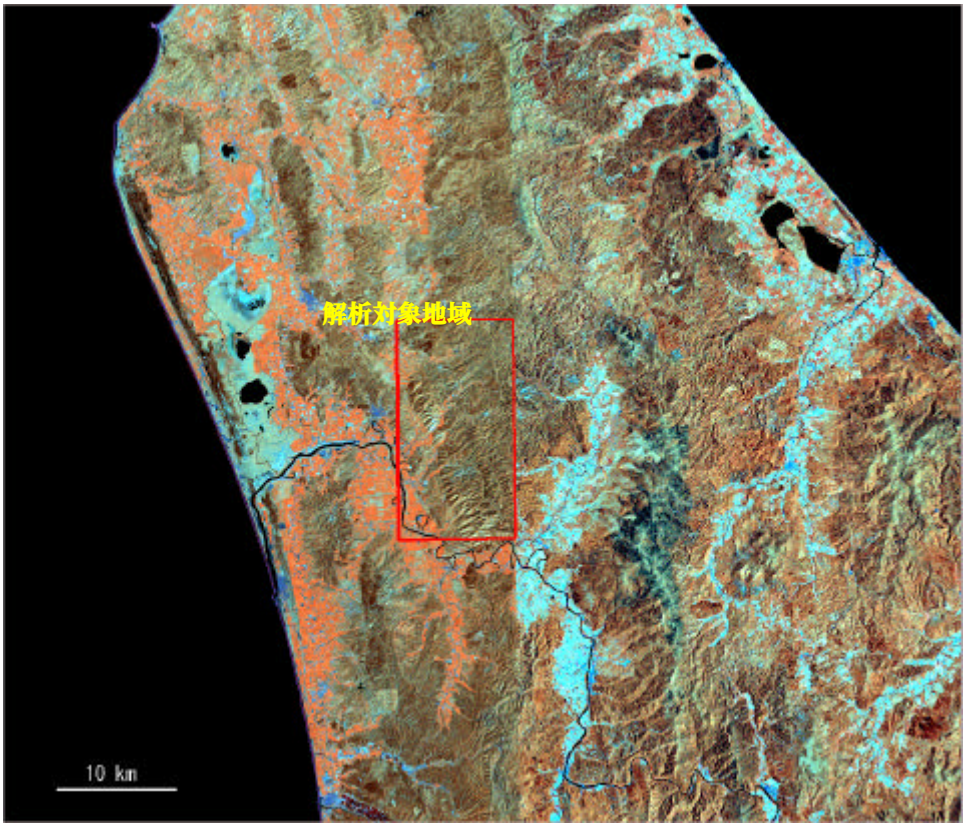
稚咲内	幌延	本流	豊神
音類	振老	安牛	上問寒別
天塩	更岸	雄信内	問寒別

貴機構より貸与された DEM は東西 0.45 秒(約 11.23m), 南北 0.3 秒(9.25m)であるため，UTM54 帯(楕円体:Bessel)で 10m 四方の DEM へ共一次内挿法によって幾何変換を行った。また，標高は 10cm 単位までを有効とした。

なお，解析は上述した 2 地域で実施したが，本地域の地形構造特性を数量化するためにはこれら 2 地域のみでは領域が小さく，計算に十分なデータを得られない。このため地形構造特性に付いては表 3.1 に示した 12 地域の 10m メッシュ DEM を用いて解析を行った。

地形特徴に注目したリニアメントの自動抽出では，2.13 項で述べたように線素の連結パラメータやスコアリング時の項目の重みなど調整すべきパラメータがある。これらのパラメータの一部(特にスコアリング時の項目間の重み)は，設定によって抽出結果が大きく変化する。したがってパラメータ調整には何らかの資料と対比させる必要がある。ここでは，貴機構から貸与された,「北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査　PNC TJ1361 94-001」に付属する，リニアメント解析結果を利用した(図 3.3)。このリニアメント解析結果の図では①活断層に相当するリニアメント，②地質断層に相当するリニアメント，③地形特徴によるリニアメント，の 3 つが対象地域内に分布する。これらのうち①と②では NNW-SSE 系のリニアメントが卓越し，③は ENE-WSW が卓越する。また，①の活断層と②の地質断層とを合わせた方位分布では NNW-SSE 系が卓越し，幌延地域の地質詳細図の断層（JNC TJ1400 98-001）での方位特性(NW-SE 系が卓越する)とは若干の相違がある。

なお，本文で使用される「判読されたリニアメント」とは，「北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査　PNC TJ1361 94-001」の調査結果を意味する。



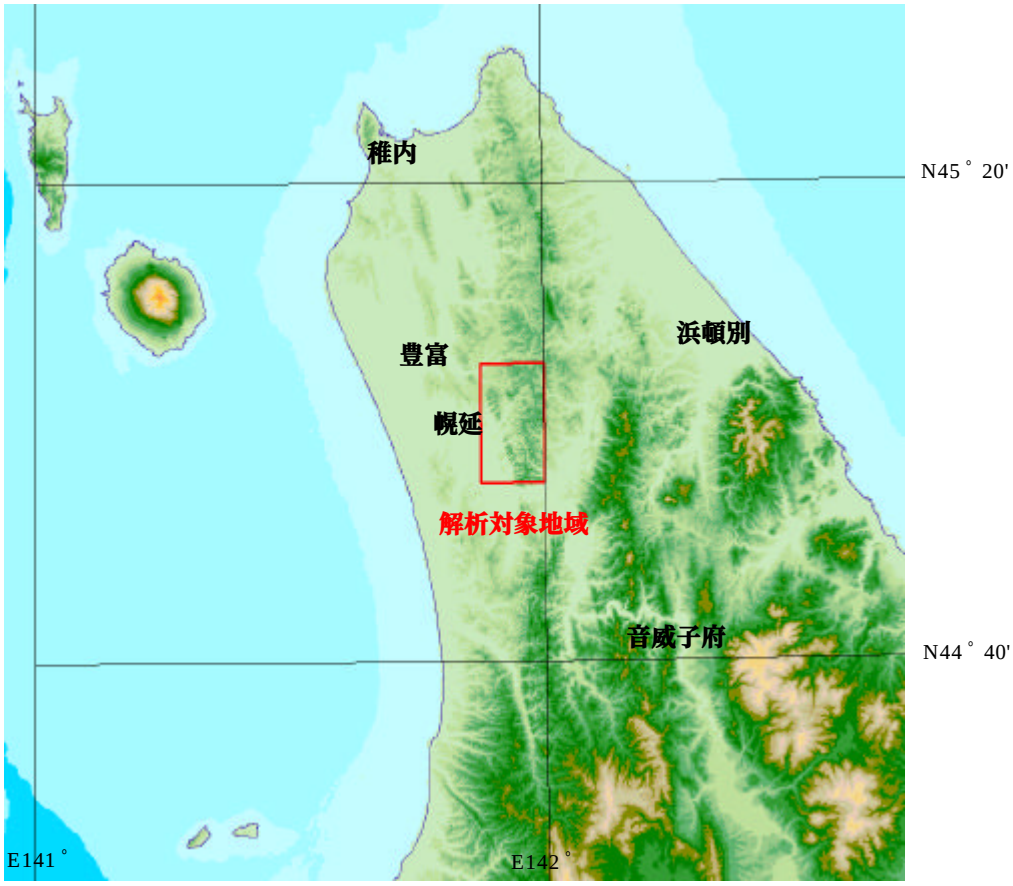
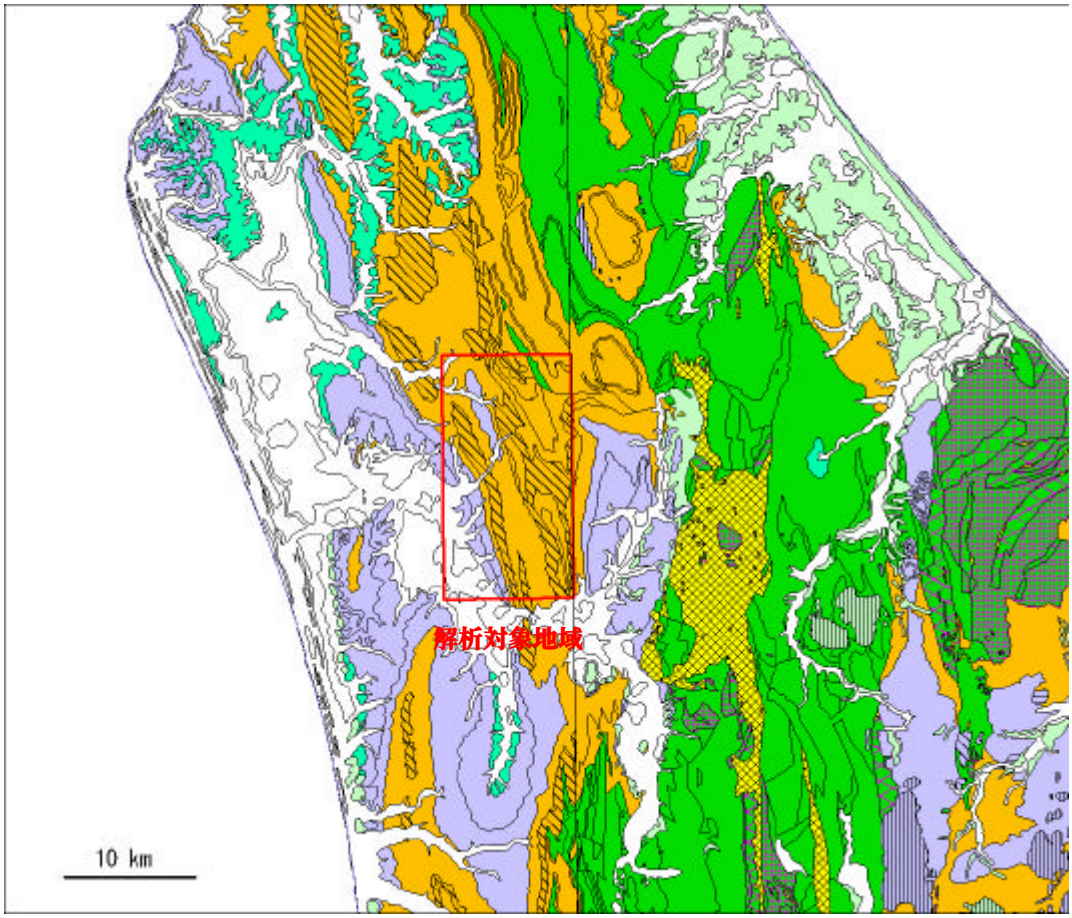


図 3.1 対象地域位置図（赤枠内）
上：LANDSAT TM RGB=457 モザイク画像
下：国土地理院「50m メッシュ数値地図(標高) III」および日本海洋データセンター「500m メッシュ水深データ(J-EGG500)」を利用した水深・標高図



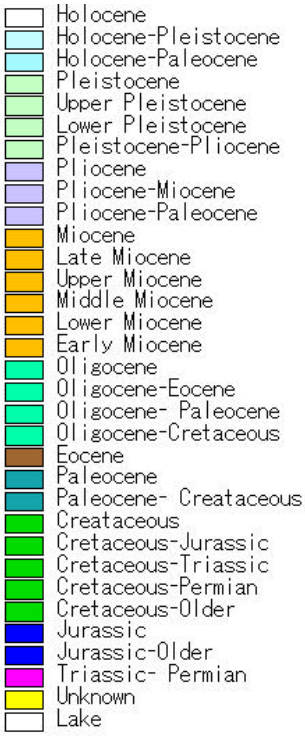


図 3.2 対象地域付近の地質図（年代）
縮尺 1/200,000 地質図(天塩・枝幸・羽幌・名寄図幅をコンパイル)

3.2　対象地域の地質と地形

解析対象とした地域は, 南西部に天塩川沿いの平野が広がり, この東側は標高 200～300m の山地からなる。山地を流れる河川は西流し，天塩川と合流する。代表的な河川として 4 つの河川(パンケオコッペ川，ペンケオポッペ川，パンケオートヌオマップ川，およびペンケオートヌオマップ川)がある。

対象地域の大局的な地形は，地表に露出する地質の層相を反映し NNW-SSE 方向に規制されている(図 3.3 および 3.4)。対象地域南西部を天塩川が北流し，天塩川沿いに氾濫源堆積物が分布し，標高 10m 以下の平坦地が広がる。天塩川東側には丘陵が分布し，その東側では標高 200～300m 程度の山地が形成されている。

丘陵部と山地は，NNW-SSE 方向のほぼ直線的な境界で画され，この境界部に大曲断層が推定されている。大曲断層西側の丘陵部では西側より恵北，更別，勇知，声問層(上部，下部)が帯状に分布し，西側ほど新しい地質が分布する。これら丘陵部では浅く細かな谷が形成され起伏の緩やかな地形となっている。このうち更別層の礫岩層に対応して NNW-SSE 方向の尾根が形成されている。

大曲断層で画された山地西端では硬質頁岩からなる稚内層が分布し，直線的で深い谷が発達する比較的起伏の大きな山地が形成されている。稚内層分布域の東側には声問層の分布域にほぼ対応して，やや起伏の小さな山地が南北に長く，帯状に分布する。大曲断層の東方 2.5km には，これと平行する幌延(ヌカナン)断層が位置し，この断層東側には再び稚内層が分布し，起伏の大きな山地が帯状に形成されている。なお，本地域北東部では稚内層の下位の増幌層および宗谷夾炭層が分布し，これらの地域ではやや起伏の小さな山地を形成している。

以上のように対象地域の地形と地質とは明瞭な対応関係が認められ，これら地形の差は，浸食に対する層相の抵抗度の差と大曲断層による構造運動によって形成されたと考えられる。

対象地域西方の沿岸部には約 12 万年前に形成された Stage 5e や約 21 万年前に形成された Stage 7 などの海成段丘が分布する(小池・町田,2001)。これら海成段丘の現在の標高と段丘が形成された当時の海水準から，対象地域西方では 0.3～0.5mm/年程度の隆起速度が推定される(図 3.5)。なお，いずれの 6 地域(抜海～初山別地域)でも Stage 5e から算出される隆起速度は Stage 7 から算出される隆起速度よりもやや大きくなる傾向が認められており，北海道北部の海岸部では隆起速度が加速している可能性がある。

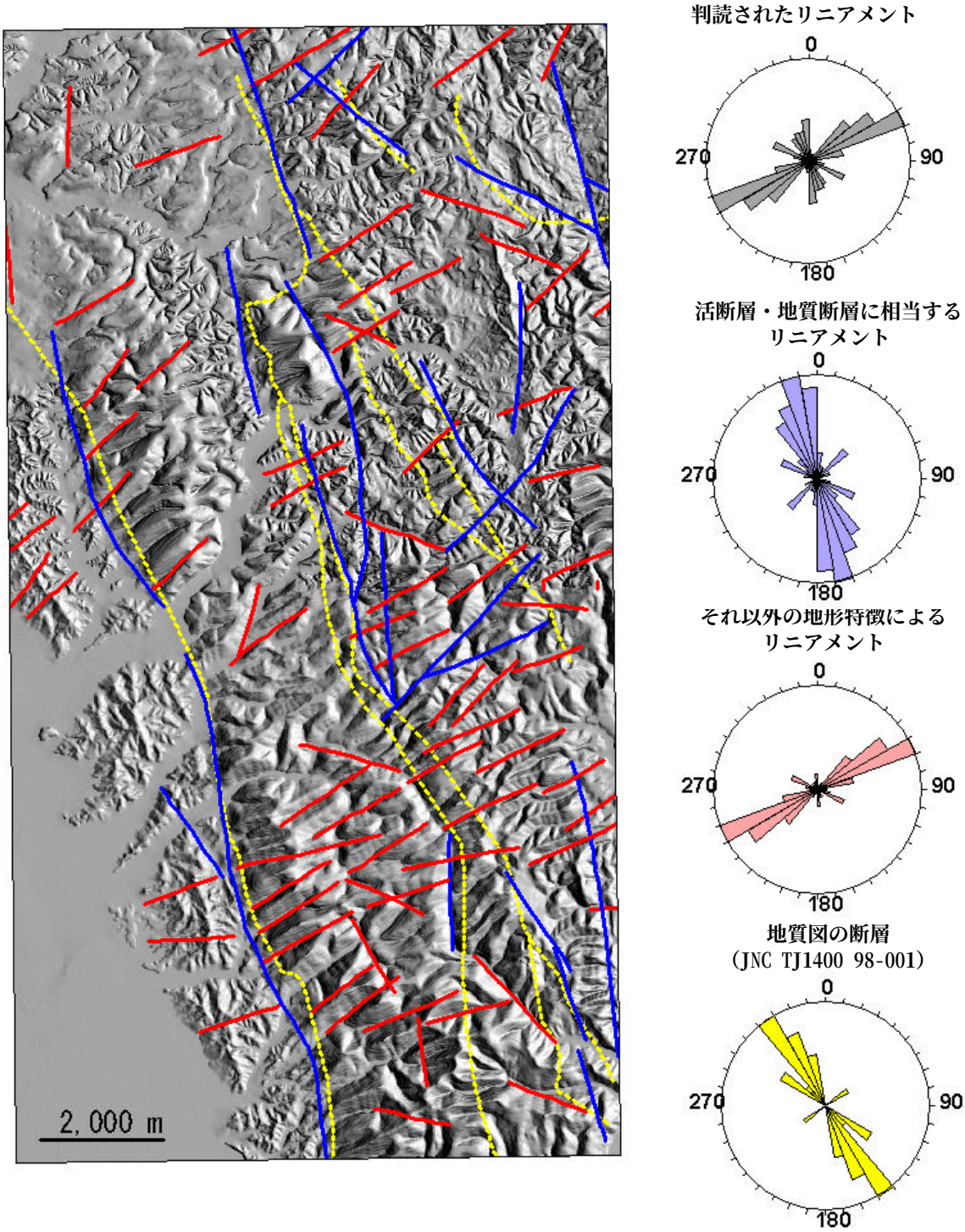


図 3.3 対象地域の陰影図, 断層および対比資料に利用したリニアメント
判読されたリニアメント:北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査
PNC TJ1361 94-001
黄色破線 :地質図の断層 (JNC TJ1400 98-001)
実線 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)
青色実線 :活断層および地質断層に相当するリニアメント
赤色実線 :それ以外の地形特徴によるリニアメント

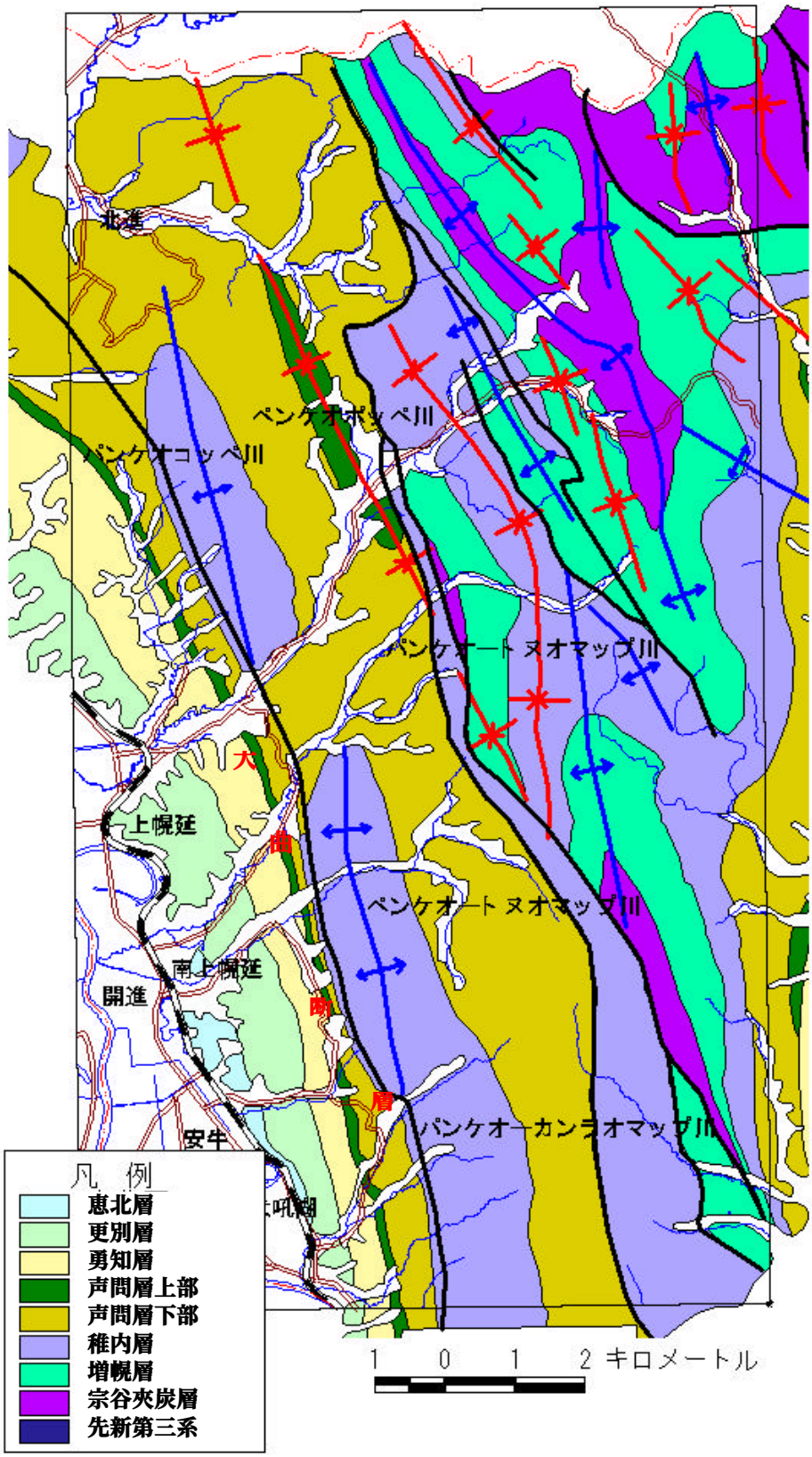


図 3.4　対象地域の地質図
JNC TJ1400 98-001　を引用

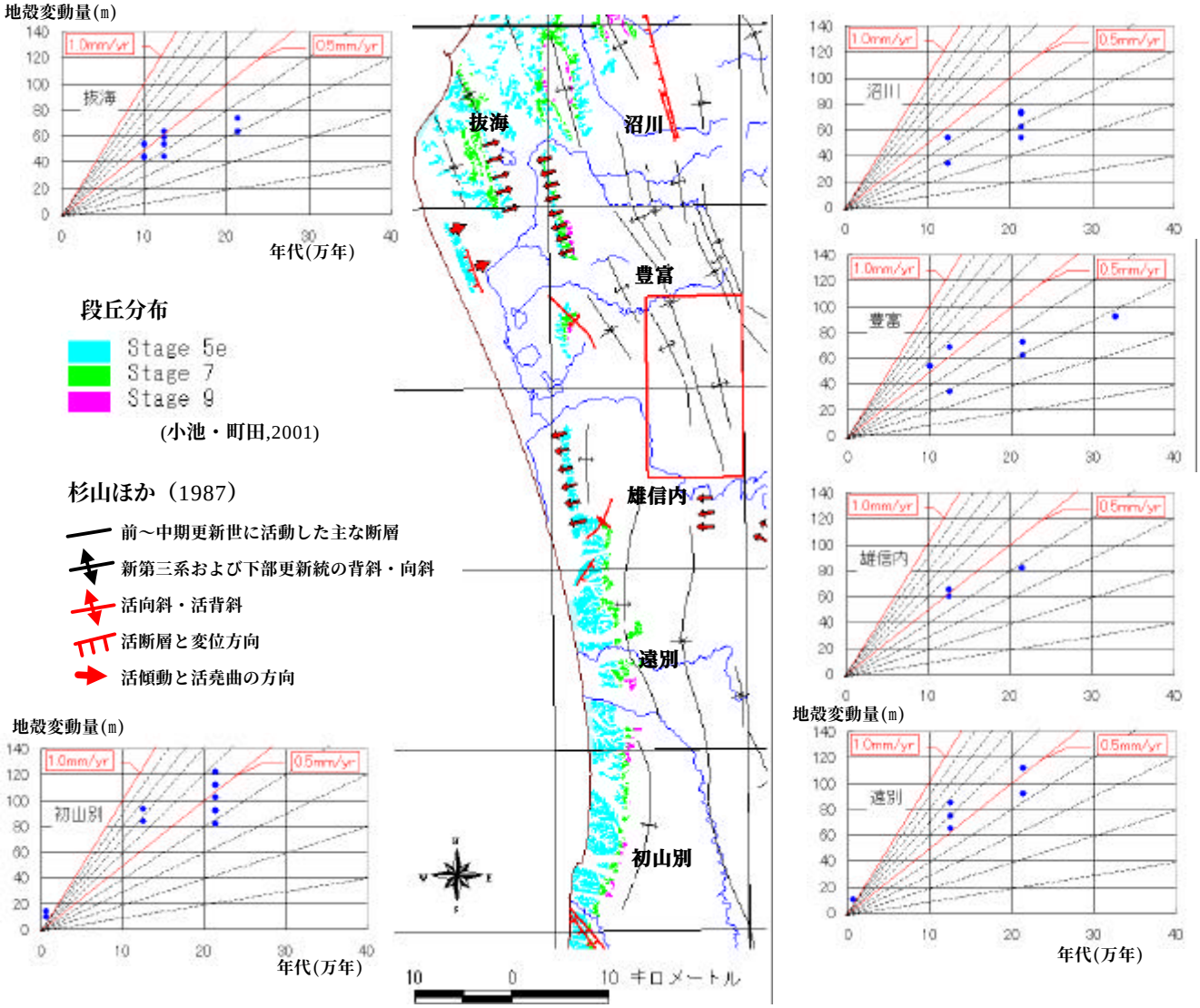


図 3.5 対象地域周辺の海成段丘および地殻変動量
小池 町田 (2001)および杉山ほか(1987)
平成13年度調査研究成果報告(2002)から引用

3.3　対象地域の地形構造特性

第 2 章 2 項で述べたように DEM から算出される傾斜から，方位別のセミバリオグラムをもとめ対象地域の地形構造特性を求めた。なお，地形構造特性は距離を変更した多数のデータ対からセミバリオグラムを計測する。このため，表 3.1 で示した 12 図幅の領域を用いて地形構造特性を決定した。

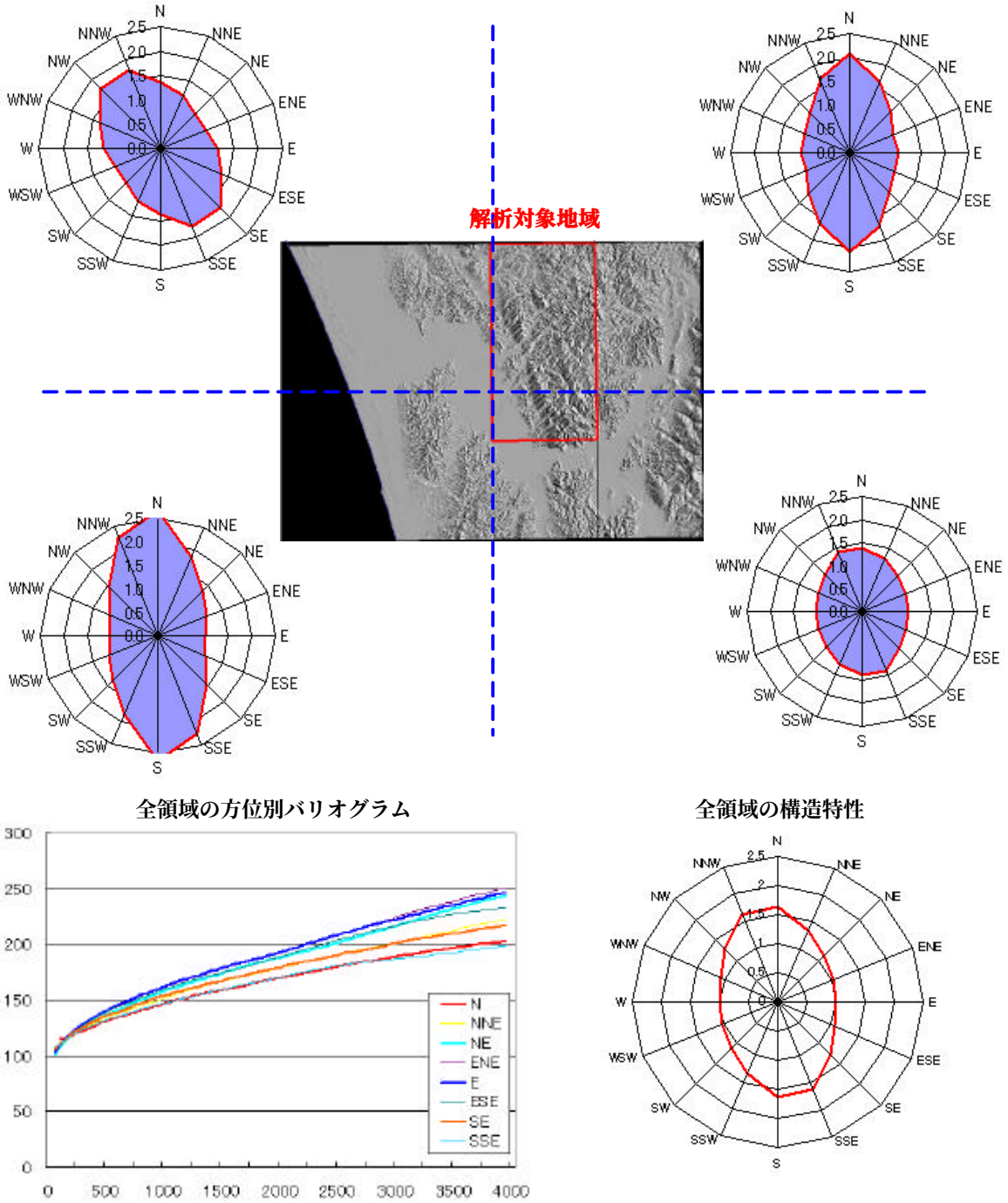


図 3.6　対象地域を含めた地質構造特性

地形構造特性は次の手順で算出した。
①全領域の方位を無視したセミバリオグラムを作成する。
②このセミバリオグラムで距離 1,250m のときのセミバリオグラム値(162)を算出する
③全領域でもとめたセミバリオグラム値となる距離を方位別のセミバリオグラムから読みとる。
④最も距離が短くなる方向を 1 として, 距離比を算出し図 3.6 右下の全領域の構造特性図を作成する。

また，領域別のバリオグラムは 4 区分した領域でそれぞれ測定し，領域毎の方位別セミバリオグラムを作成する。このとき構造特性を求める距離は全領域に利用した値を用いる。

なお，4 領域で算出した構造特性値は 4 領域の中心を代表するものとする。したがって，任意点での構造特性値は，4 つの点からの距離比(共一次内挿)によって変化させるものとした。したがって，対象地域は右上の領域の左側に位置することから，左上と右上を合わせたような構造特性となる。

図 3.6 には領域毎に算出した構造特性値と, 全領域の方位別バリオグラムおよび構造特性値を示した。領域全体では N-S～NNW-SSE の構造が卓越しており，その異方性は約 1.6 とやや強い構造特徴があることを示している。この特徴は図 3.3 で示した活構造の方位特性とほぼ一致しており，セミバリオグラムによって測定した地形構造特性が，その地域の地質構造特性と整合的であることがわかる。

領域別の構造特性は，東側の領域では N-S 方向が強いのに対し，南西側では N-S 方向から北西方向では NW-SE 方向に変化している。図 3.5 の雄信内西方の海岸付近では N-S 方向の褶曲構造があり，地形構造特性はこの褶曲構造を反映したものと考えられる。また，図 3.5 の幌延北西方には NW-SE 方向の褶曲および活褶曲があり, これらの影響によって地形構造特性が NW-SE 方向を示すものと考えられる。

4 つの領域のうち，北東と南西領域では地形構造特性の異方性は 2.0 を超え，強い異方性が認められる。これに対し，北西および南東領域での地形構造特性は 1.6 前後とやや強い異方性を示すにとどまっている。

3.4　対象地域の傾斜特徴

2.2 項で述べたように，傾斜は地質の硬さと隆起速度(構造運動)を反映することから，構造特性を表しやすい。図 3.7 には対象地域の地形図を，図 3.8 には標高を色の差として表した段彩図を示した。図 3.9 は図 3.8 の DEM から算出した傾斜量を表し，隣接する 3 点(注目点，右，下)から平面を算出し，この平面の傾斜を求めた図である。

この傾斜量図は地質図と比較的良く対応し，この地域の構造運動が均等であるならば，これら傾斜の違いは岩石の硬さの違いを表していると考えられる。最も傾斜の急となる地質は稚内層であり，これに接する下位の増幌層および上位の声問層下部では，やや緩やかな斜面を形成している。また，同じ層序であっても稚内層が大曲断層と接する地域では特に急な斜面を形成している。同様に，声問層下部では，大曲断層西側では傾斜は緩く，大曲断層東側に分布する地域では，断層西側よりも傾斜の急な斜面を形成している。

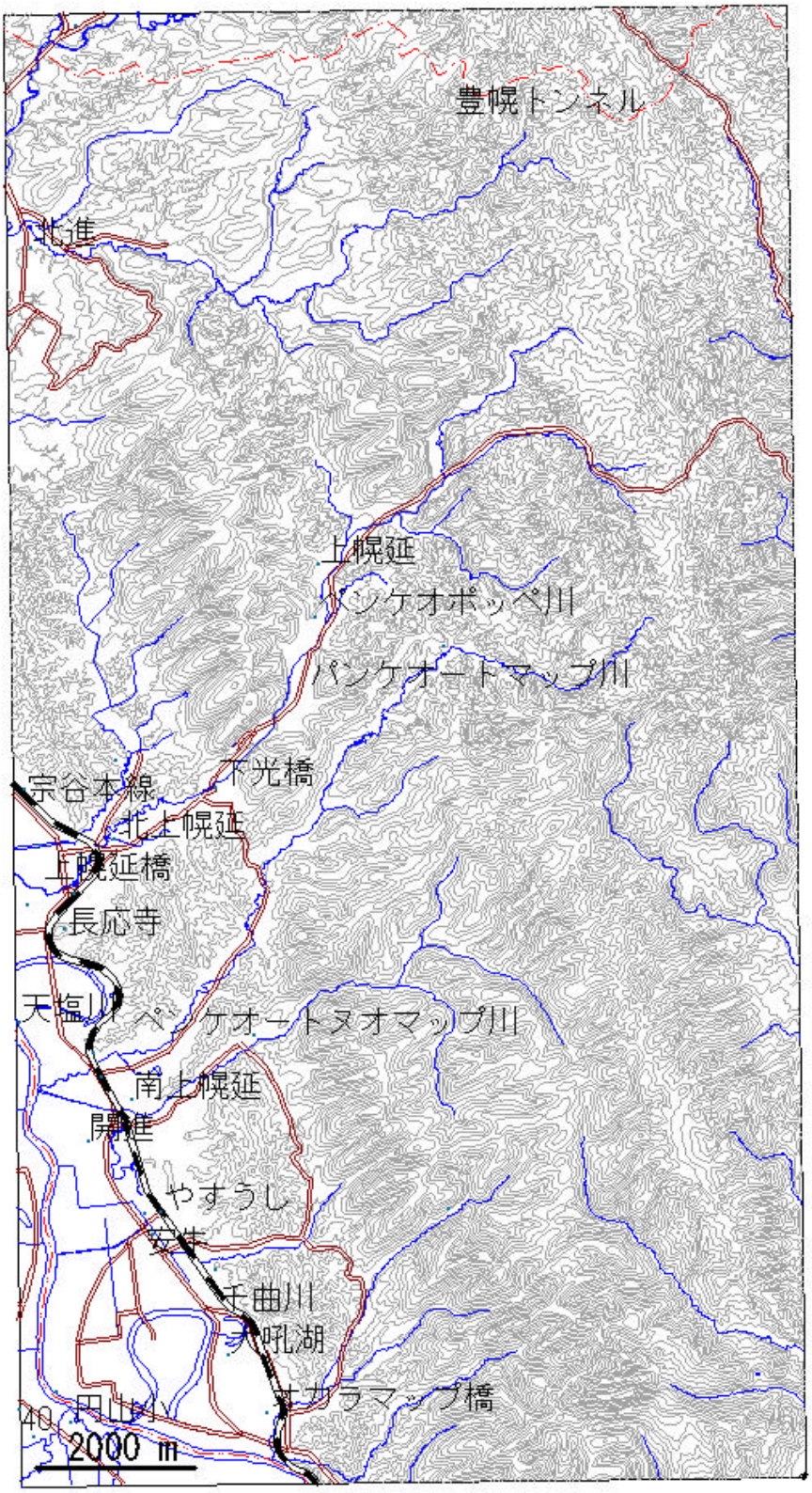


図 3.7 対象地域の地形図

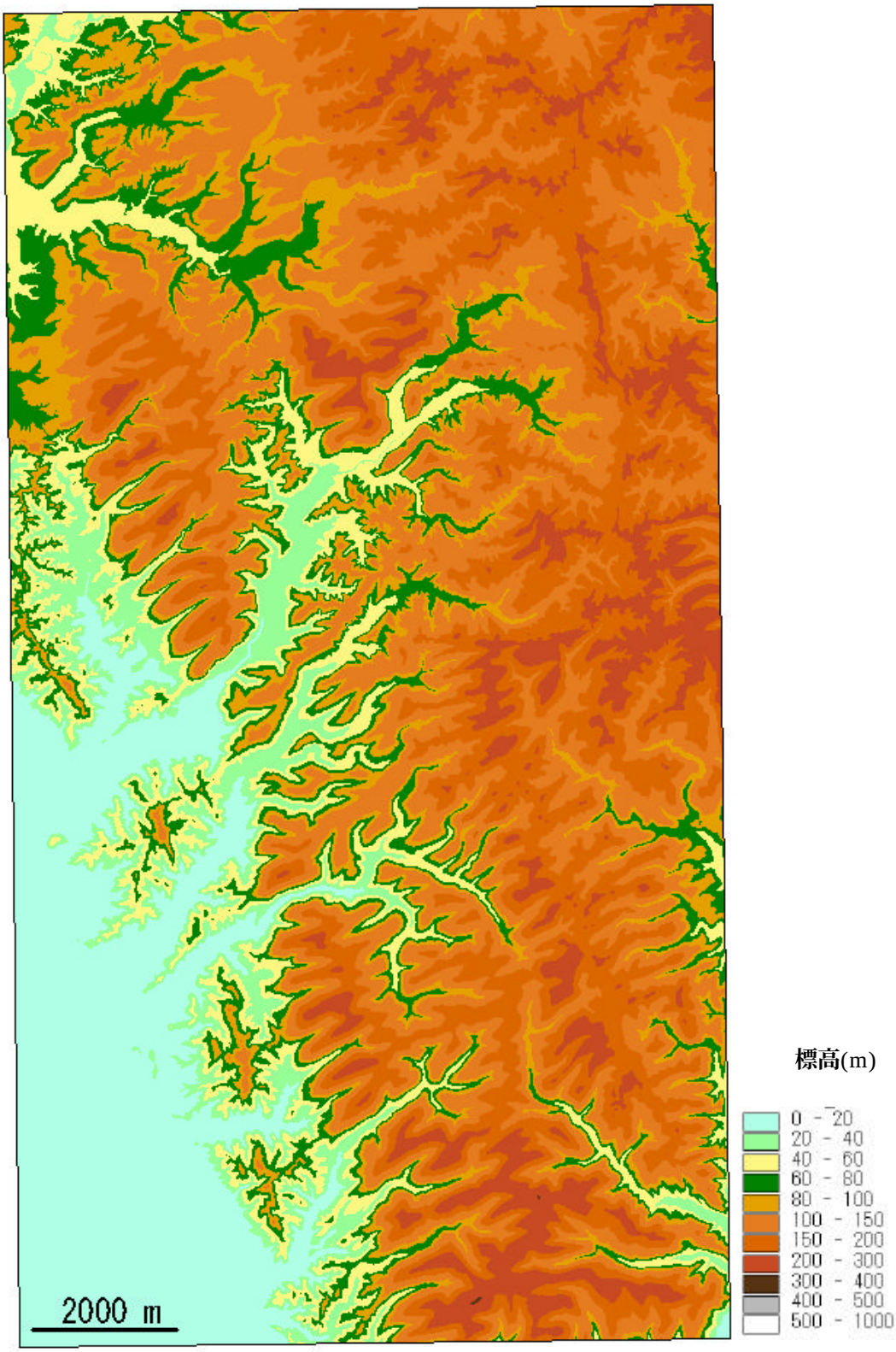

2000 m
標高(m)
0 - 20
20 - 40
40 - 60
60 - 80
80 - 100
100 - 150
150 - 200
200 - 300
300 - 400
400 - 500
500 - 1000

図 3.8　対象地域の標高

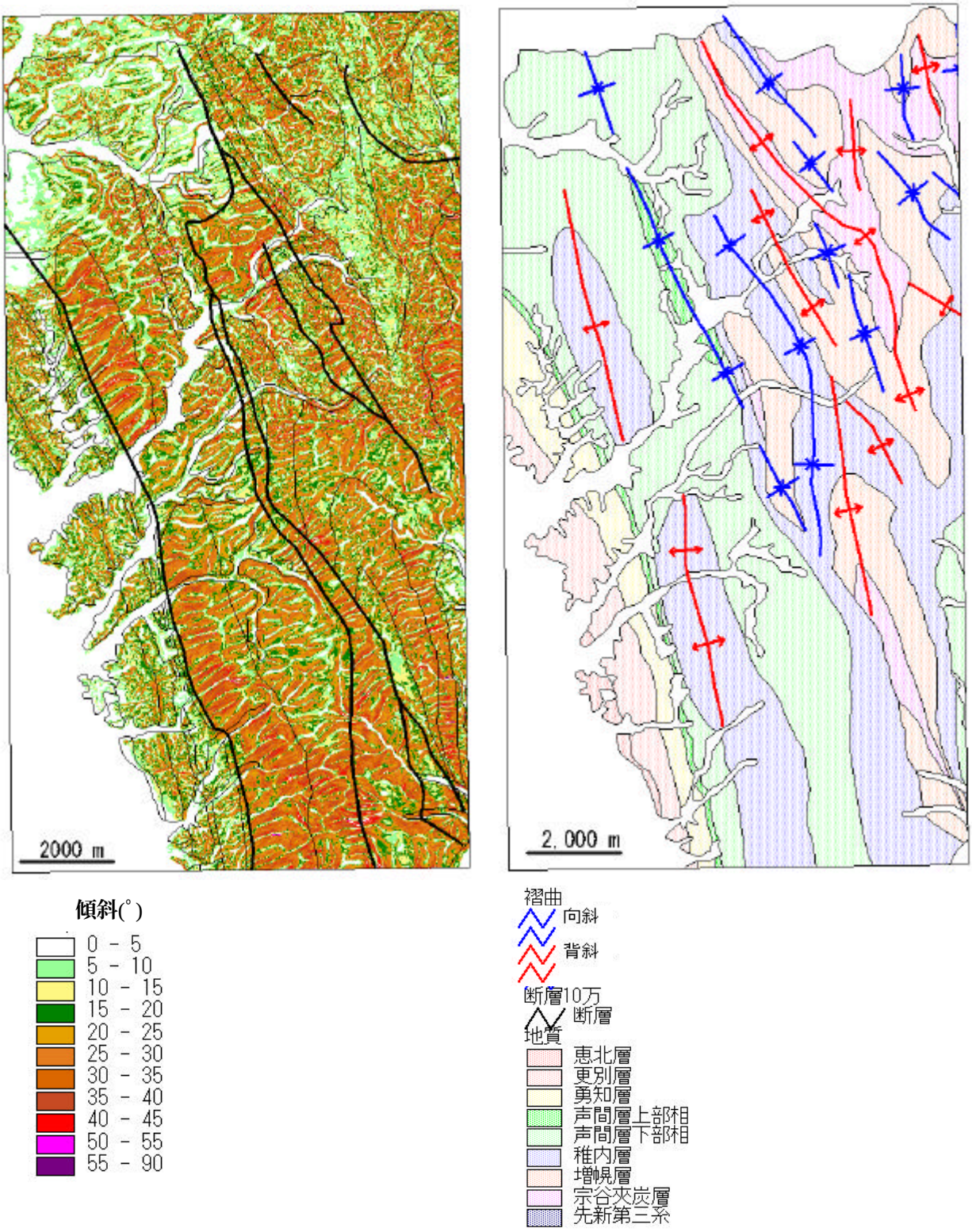


図 3.9　対象地域の傾斜と地質図の比較

3.5　流路の抽出とパラメータ設定

地形特徴から抽出されるリニアメントでは，直線的な流路として認識されるものが最も多い。したがって，DEM から抽出される流路情報は，リニアメントの自動抽出を行う際にに重要な要素である。ここでは，流路を定義する谷頭のパラメータを変更し，10mDEM を利用する際に最も適したパラメータを検討した。

第 2 章 4 項で述べたように，流路先頭である谷頭の位置を決定するパラメータが重要である。日吉川流域では，0.18(ラプラシアン)を超えた位置を谷頭と定義することができること示した。ただし，日吉川では利用した DEM は空間分解能 5m であり，本解析で利用する DEM の分解能とは異なっている。同じ地形であっても DEM の空間分解能が異なると，標高のサンプリング間隔が異なることから，算出されるラプラシアンは変化してしまう。

ここでは，谷頭とするラプラシアンを 0.15，0.25，0.35 と変化させ，谷形状と抽出された流路との対応関係から，最適となるパラメータを決定した。なお，ラプラシアンの閾値を小さくすると，より上流側に谷頭が設定されるが，谷として通常は判読しない位置まで流路が伸びてしまう。これに対し，ラプラシアンの閾値を大きくしすぎると，判読で認められるような地形が存在しても，流路として認識されないケースが現れる。

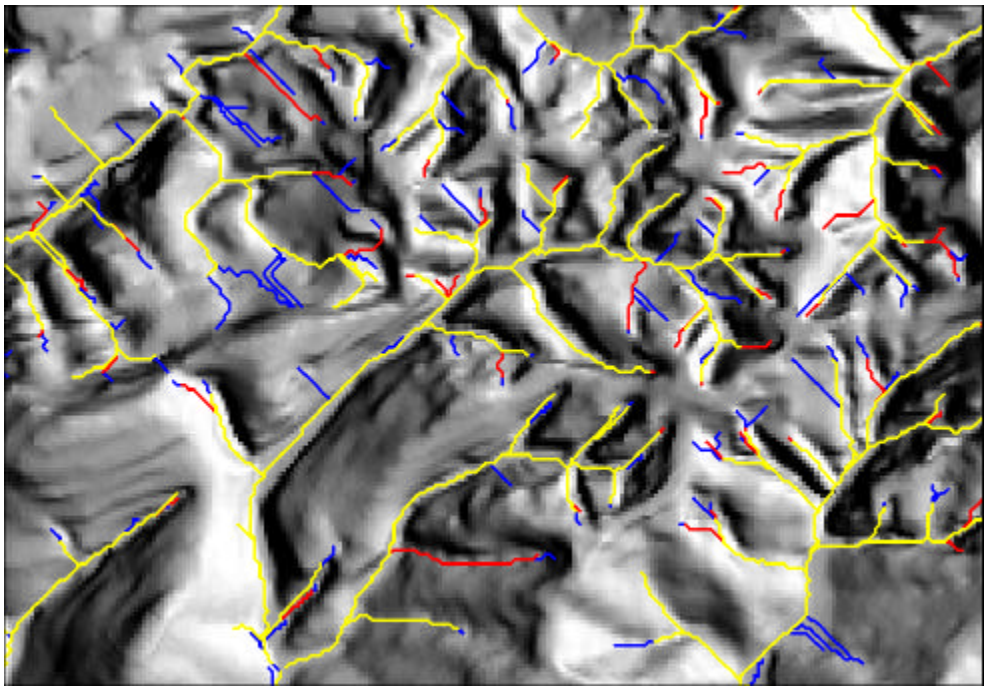


図 3.10　谷頭を定義するラプラシアンと抽出される流路
青 :ラプラシアン 0.15 で抽出される流路
赤 :ラプラシアン 0.25 で抽出される流路
黄 :ラプラシアン 0.35 で抽出される流路
背景は陰影図　図の差し渡しは 2.2km

図 3.10 は，ラプラシアンを変更したときに抽出される流路を，青(閾値=0.15)，赤(閾値

=0.25)，黄色(閾値=0.35)の順に重ね合わせた図である。閾値を小さくするほど流路は上流に伸びるので，青＋赤＋黄色の流路が閾値 0.15 で抽出される流路となっている。

図 3.10 では青の流路(青＋赤＋黄色)は斜面で並行になるケースがあり，また，明瞭な凹型の地形でなくとも流路が形成されていることを示している。したがって，0.15 では谷頭を定義する閾値として小さすぎるといえる。

閾値 0.35 とした黄色の流路では，図 3.10 中央下部で明瞭な凹地形がありながら，流路として抽出されていないケースがあることを示している。したがって，谷頭の定義として 0.35 は大きすぎる。

赤の流路は，凹形状の見られない斜面には流路は抽出されておらず，また，明らかに凹形状の地形では流路が抽出されている。

以上のことから，谷頭と定義するラプラシアンをここでは 0.25 と決定した。

次に流路情報をベクトル化し，第 2 章 4 項で述べたように流路を直線と見なせる区間で分割した。流路の分割アルゴリズムは第 2 章 4 項で述べた数値を利用した。

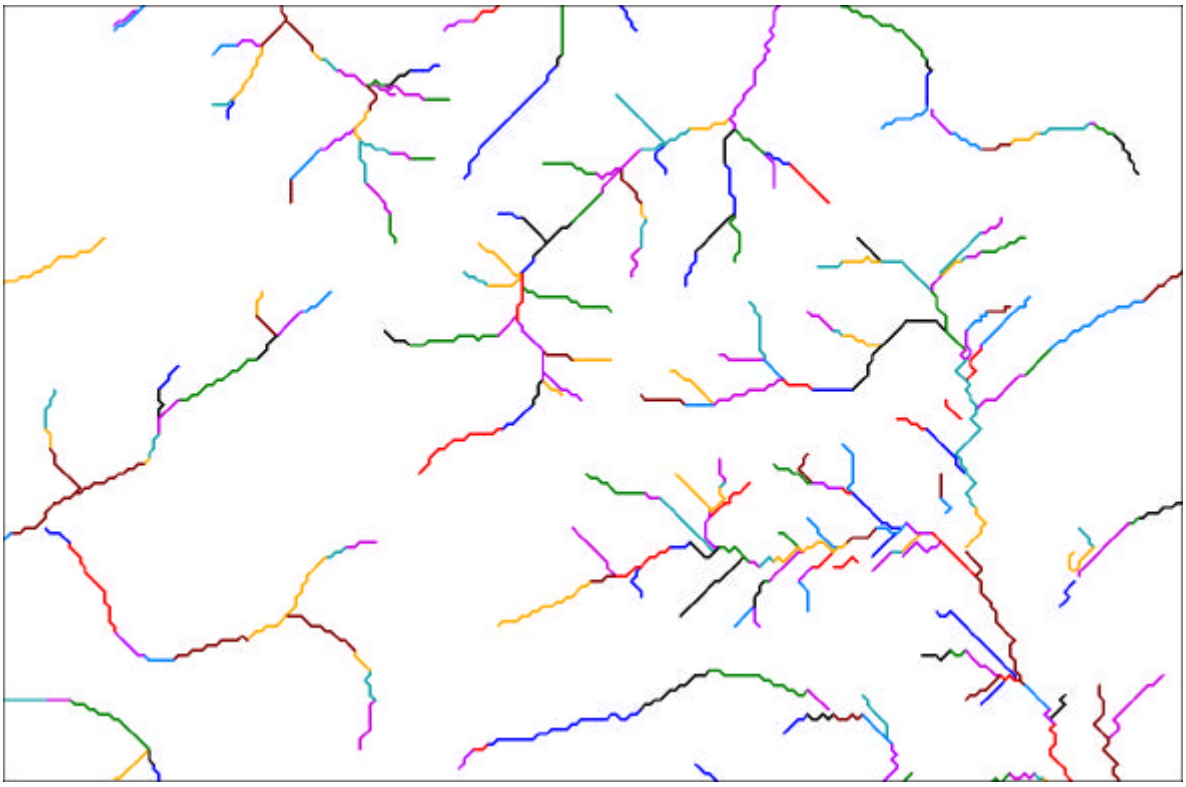


図 3.11 直線と見なせる区間で分割した流路
直線として見なせる区間で切断した流路は 1 つの色として表現した
図の差し渡しは 2.4km
なお，この図では既に平坦部の流路を削除してある

DEM から抽出した流路は平坦部では平行流となり，非常にわかりにくい流路網となってしまう。これは，平坦部の DEM に標高差がないため流路の合流や屈曲が無く，合流せずに

流れてしまうためである。これを避けるため，平坦部では乱数を加えて流路を蛇行させる方法もあるが，いずれにしても正しい流路位置や合流関係を表しているわけではない。したがって，これら平野部の流路をリニアメント抽出に利用することは無意味である。

ここでは，図 3.11 で示した切断後の流路毎に，始点・終点・中間点(複数)の点で，流路と直交方向にラプラシアンを計測した。このラプラシアン値がすべて 0.25 以下となった流路は平坦部を流れるものと判断し，この流路を削除した。なお，ラプラシアンの測定は，流路から両側 50～70m と流路上の 3 点で計測している。

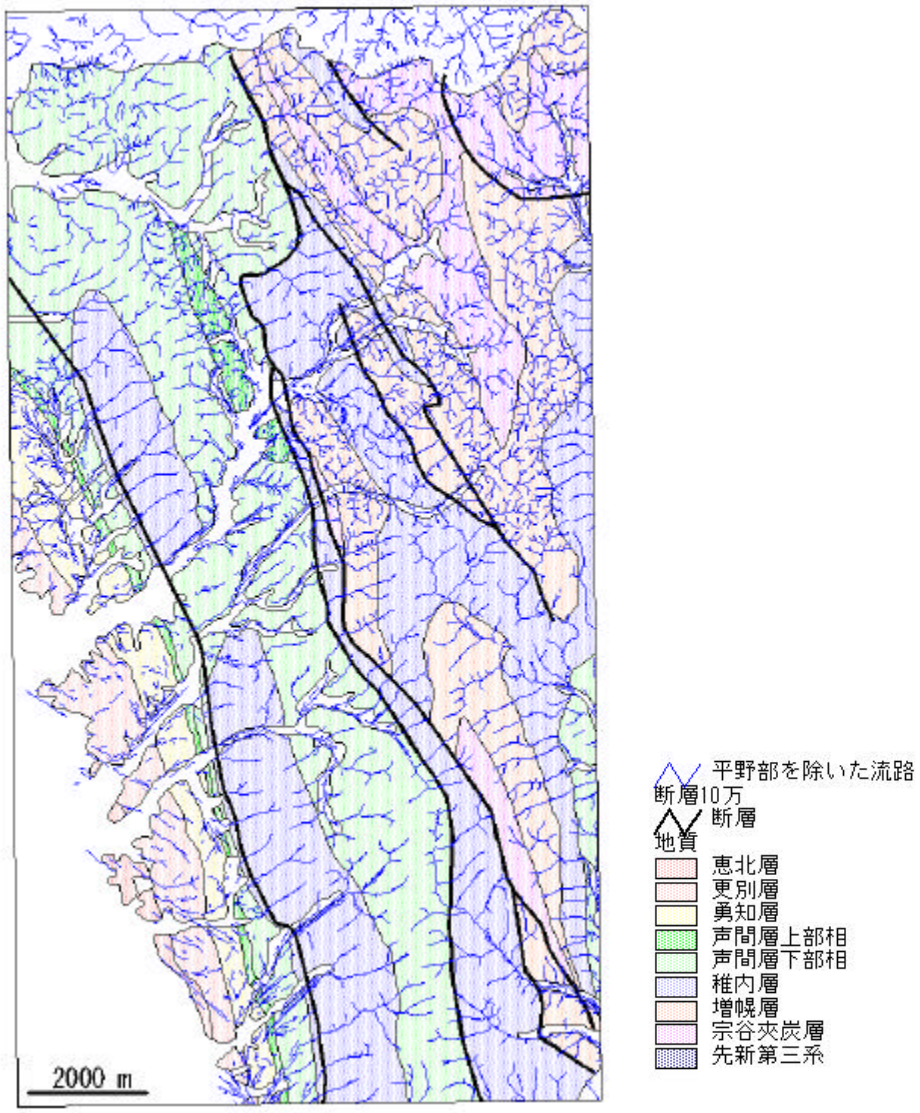


図 3.12　平野部を除去(閾値<0.25)した流路と地質との関係

図 3.12 には平坦部を流れる流路を削除した流路図を示した。また，背景に地質図を表示した。図 3.12 は，流路密度が均一ではないことを示している。流路密度の低い地質としては，稚内層や声問層下部があり，比較的流路密度が高い地質は，声問層上部および一部の

増幌層がある。

表 3.2 地質単元と主な層相

時代	地質単元	主な層相※	流路密度
更新世	恵北層	砂，礫，粘土　未固結	?
	更別層	砂岩，礫岩，泥岩　固結度低い	
鮮新世	勇知層	砂岩（礫岩含む）　固結度低い	
中新世	声問層上部相	泥岩，砂質泥岩	高
	声問層下部相	泥岩，砂質泥岩	低
	稚内層	硬質頁岩	低
	増幌層	礫岩，砂岩，泥岩	高(一部低)
	宗谷夾炭層	砂岩，頁岩，礫岩	中

※動力炉・核燃料開発事業団(1998)：貯蔵工学センターに関する調査のとりまとめ　PNC TN1420 98-003

図 3.12 で示したように，流路密度境界と地質境界と必ずしも明確に対応するわけではないが，分布域の形状は概ね地質境界と一致している。

大曲断層付近の流路の特徴は，断層以東の河川長が比較的短く(1～1.2km)，ほぼ等間隔で平行することである。この流路間隔は概ね 400m 程度であり，河川長が短い割には谷が深いことが特徴となっている。

3.6　傾斜変換線の抽出

傾斜変換線は 2.5 項で述べたように，落水線方向のラプラシアン異常(正のみ異常とする)の分布から線認識をさせるものである。このときパラメータとしてはラプラシアン異常の閾値，方向検出オペレータのサイズ，検索距離，許容角などのパラメータがある。このうちオペレータのサイズを決定すれば，認識される線素の間隔がほぼ決定されるため検索距離はオペレータのサイズから概ね決定される(1.5～2 倍程度)。したがって，このパラメータはあまり結果に影響しない。また，許容角は方向検出オペレータが 10°単位でしか検出できないことから，これについても±10°以下が目安となり大きく変更されるパラメータではない。

これに対し，オペレータのサイズは結果に大きく影響する。オペレータサイズを 24，36，48，72 メッシュ(検出されるベクトル長に相当し，それぞれ 240～720m となる)として比較した。なお，いずれのメッシュでも，次の位置とは 50%の重複を持たせるものとした。

検索距離はオペレータサイズの 1.5 倍とし，これに図 3.6 に示した地形構造パラメータを乗じた距離を検索距離上限として用いた。連結に利用する扇形領域の頂角は 15°とした。

抽出結果と比較するリニアメントは，「北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査」に付属する，リニアメント解析結果を利用した。

図 3.13～3.16 には方向検出オペレータのサイズを 24～72 メッシュまで変化させた結果を示した。いずれの図とも，黄色の細線は検出された傾斜変換線を，黄色の太線は STA によって 2 つ以上の傾斜変換線が連結されたグループを，水色は判読されたリニアメント（図 3.3 の説明を参照）を表している。また，ローズダイアグラムはリニアメントの本数を用いて作成した。

結果を見ると，検出された傾斜変換線，連結されたグループとも NE-SW～ENE-WSW 方向が多くなっている。なお，方向検出オペレータのサイズを 36 メッシュとした場合(図 3.14)では，ローズダイアグラムの最頻方向はやや北向きに変化し，NE-SW 方向の傾斜変換線が卓越している。

検出された傾斜変換線は，大曲断層の東側の山地で，斜面と平行して多く検出されている。これ以外の北東および南東域では，NNW-SSE～NW-SE 系の傾斜変換線が比較的多く検出されている。

方向検出オペレータのサイズを大きくすると，連結された傾斜変換線の長さは徐々に長くなる。このことは，大曲断層付近で顕著となっている。方向検出オペレータのサイズが小さい場合には，図 3.13 のように大曲断層に相当する地域には傾斜変換線は検出されない。これに対し図 3.16 の方向検出オペレータサイズ(72 メッシュ)では，南部域の大曲断層に相当する位置に傾斜変換線が現れている。

判読されたリニアメントのローズダイアグラムの特徴は，

①NE-SW～ENE-WSW 方向が卓越する

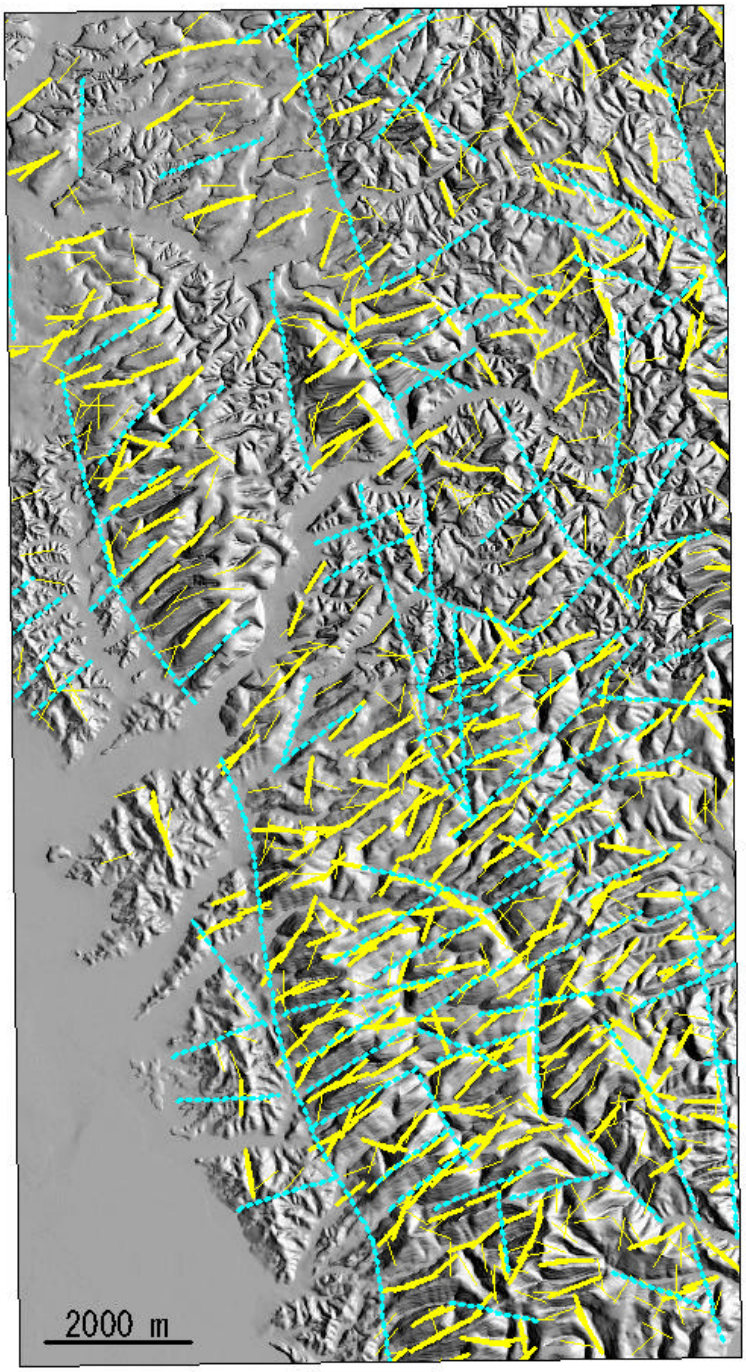
②この方向を挟んだリニアメント方位の頻度は非対称であり，NE-SW 系のリニアメントの頻度は徐々に減少するが，E-W 系はほぼ認められなくなる
③これ以外に N-S 系および NW-SE 系のリニアメントがやや多くなる
ことである。

方向検出オペレータのサイズを変更し，傾斜変換線の検出・連結を行った結果と，判読されたリニアメントのローズダイアグラムとを比較すると，図 3.16 の方向検出オペレータのサイズを大きく取った 72 メッシュの結果が最も良く類似している。ただし，地形の規模(陰影図)と検出される傾斜変換線の線素を比較すると，大曲断層東側の山地での水系長は，オペレータサイズとほぼ等しい長さとなっている。傾斜変換線の抽出は 1 つの斜面上に現れる複数の傾斜変換線を連結して抽出することを目的としており，その意味では明らかにこのサイズでは大きすぎると言える。同様に図 3.15 でも検出される傾斜変換線の長さは，水系長の半分程度であり，このサイズでもやや大きい。

したがって，ここでは地形規模を考慮し複数本の傾斜変換線が 1 斜面で検出される，方向検出オペレータサイズ　24 メッシュとした結果を利用した。

図 3.17 には方向検出オペレータサイズを 24 メッシュとしたときの陰影図と傾斜変換線の検出結果を示す。図 3.17 の上は陰影図とリニアメント判読結果を表している。ここで問題は陰影図に等高線と平行する縞が認められることにある。この縞は傾斜の緩急があることを意味しており，等高線上では傾斜は緩く，等高線間は急な傾斜が計算されている。この緩急の繰り返しは, 等高線から DEM を算出する際に利用するアルゴリズムによって形成されるものと推定される。したがって，このアルゴリズムによって発生した斜面の緩急を傾斜変換線として検出した可能性もある。

本地域の傾斜変換線の方位特性は地形構造の発達する方向と異なり，これとほぼ直交する方向が卓越することが特徴となっている。なお，第 2 章で例として示した阿武隈地域での解析では，傾斜変換線の卓越方向は地形構造と一致している。



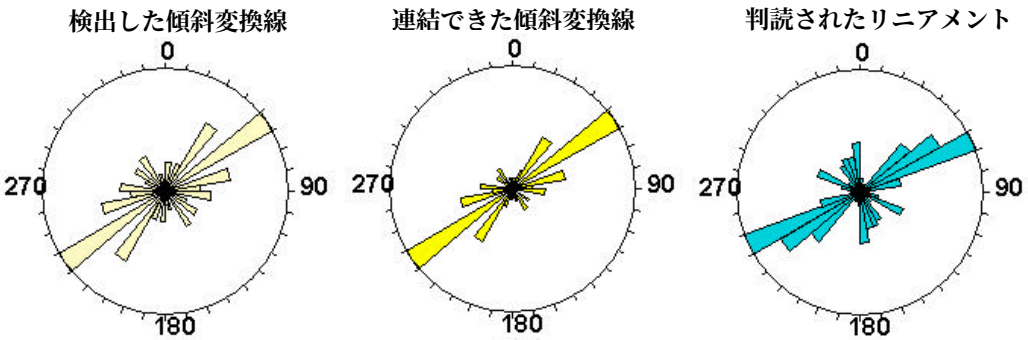


図 3.13 傾斜変換線の抽出結果(オペレータサイズ 24 メッシュ)
黄色細線 :検出した傾斜変換線　黄色太線 :連結された傾斜変換線
水色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)

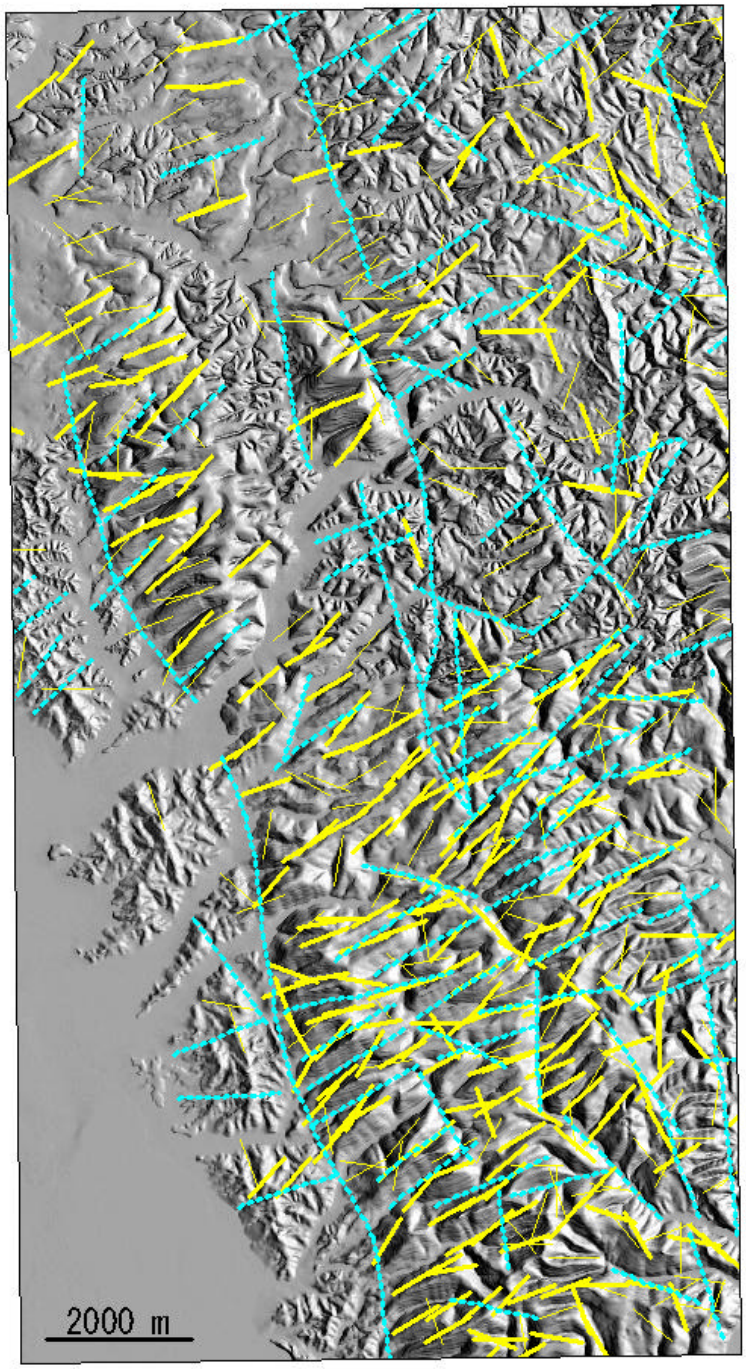
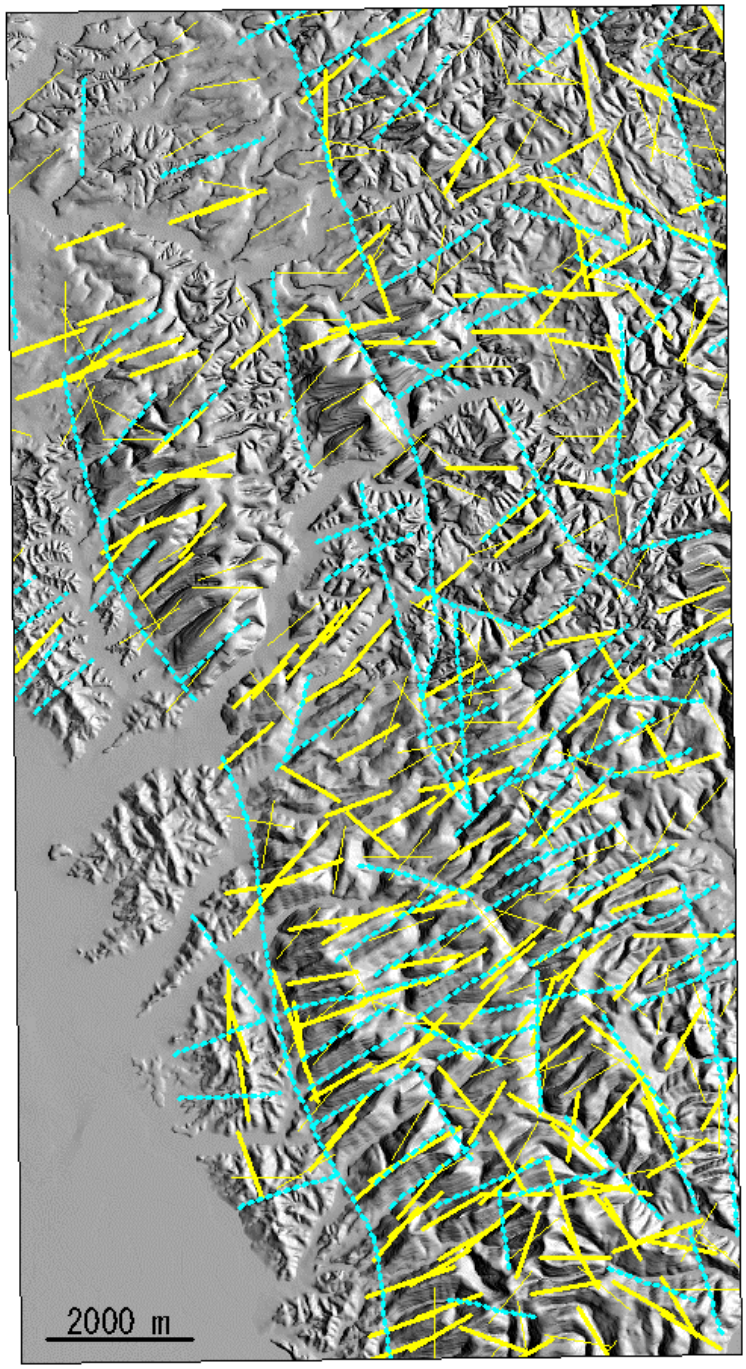


図 3.14 傾斜変換線の抽出結果(オペレータサイズ 36 メッシュ)
黄色細線 :検出した傾斜変換線　黄色太線 :連結された傾斜変換線
水色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)



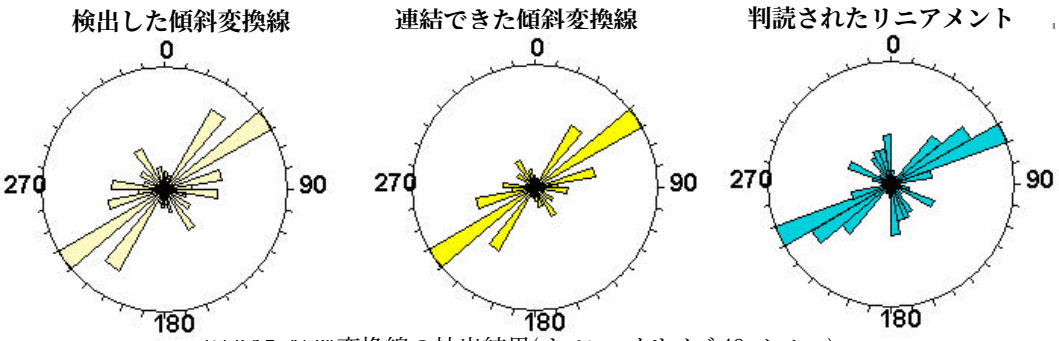


図 3.15 傾斜変換線の抽出結果(オペレータサイズ 48 メッシュ)
黄色細線 検出した傾斜変換線　黄色太線 連結された傾斜変換線
水色 判読されたリニアメント 北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)

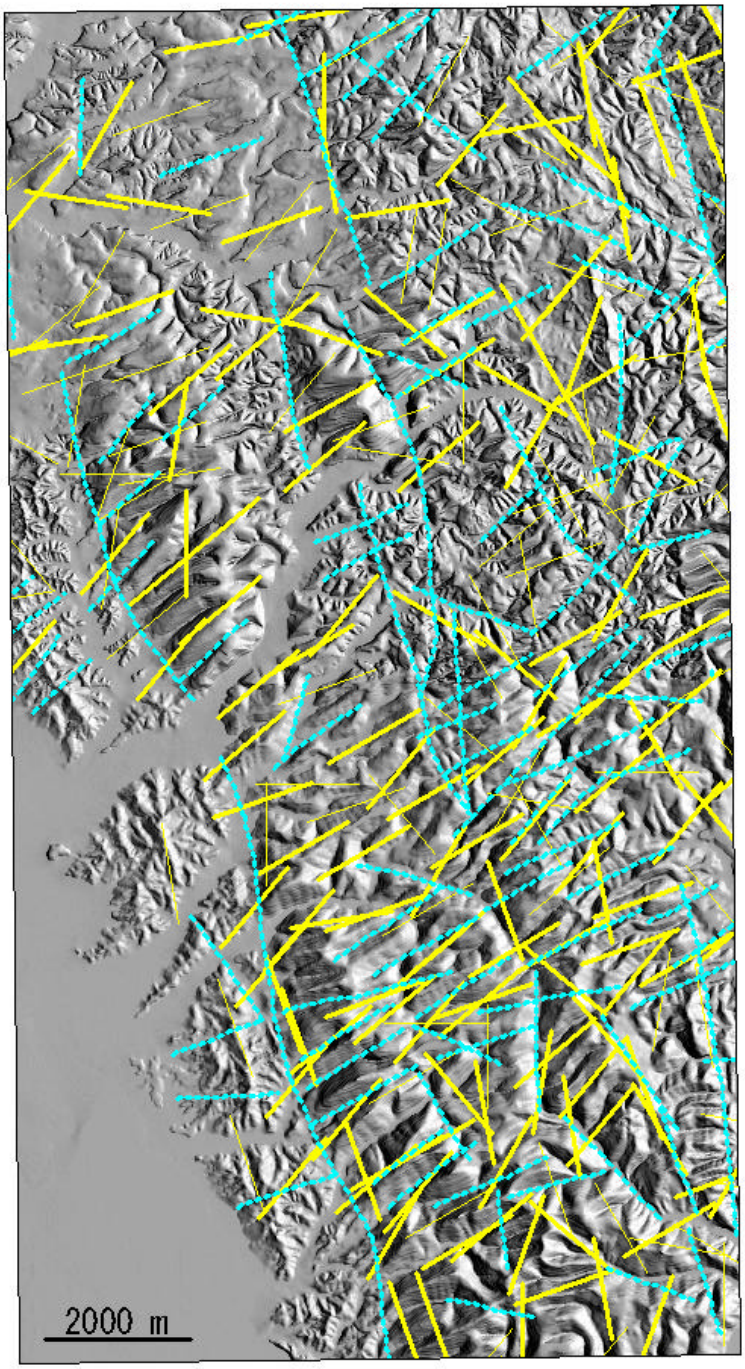


図 3.16 傾斜変換線の抽出結果(オペレータサイズ 72 メッシュ)
黄色細線 :検出した傾斜変換線　黄色太線 :連結された傾斜変換線
水色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)

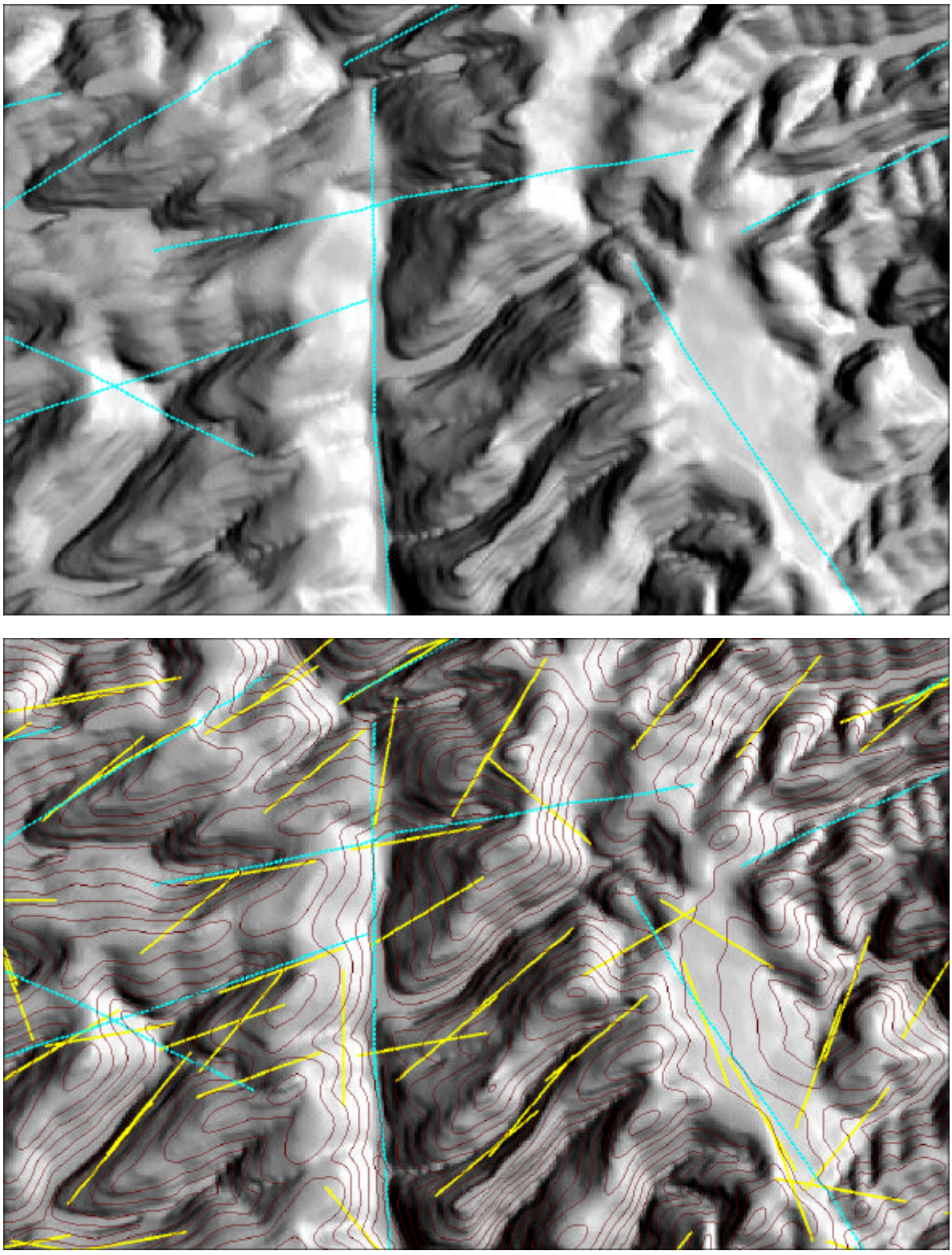


図 3.17 DEM に認められる斜面の緩急の繰り返し
上 :陰影図と判読されたリニアメント(水色)
下 :検出 ・連結されたリニアメント 黄色) と等高線(20m 間隔)
図の横幅 3.3km

3.7　山地/平野直線境界の抽出

2.6 項で述べたように，直線的な山地/平野境界の認識は複雑な過程を経て抽出される。この原因は，目視で大まかに眺めた場合には線状の明瞭な境界が認められたとしても，細部は入り組んだ形状を持つことによる。目視の場合では，識別は大領域→小領域へと識別するスケールを変化させる。これに対し，コンピュータでは小領域→大領域と逆の過程を踏み，巨視的には明瞭であっても，細部が入り組んだ境界を識別させることは難しい。

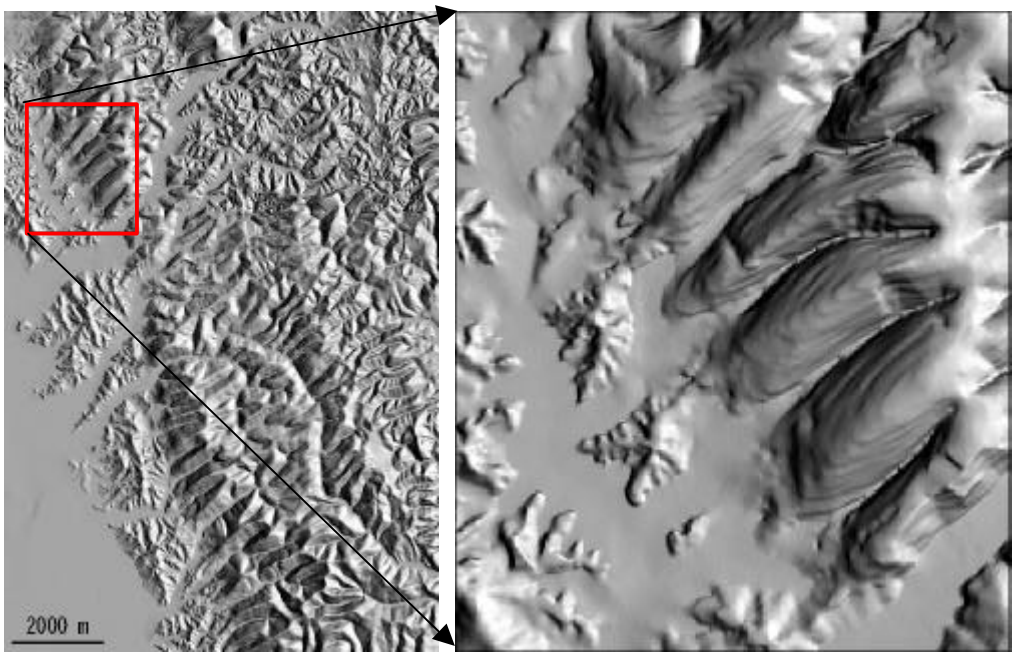
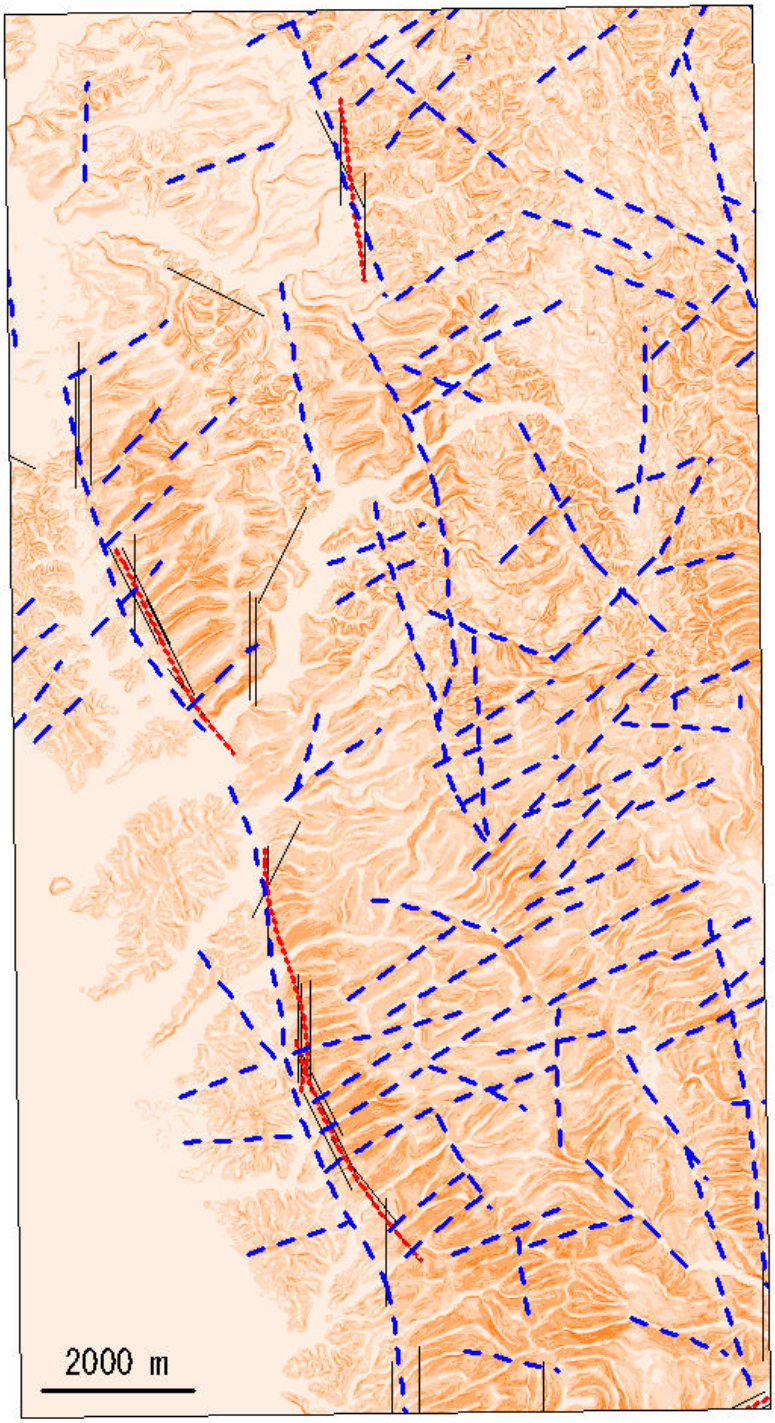


図 3.18　目視で明瞭な山地/平野境界とその拡大
赤枠は右の拡大範囲　(右図の左右は 2.4km)

このため，スケールを落とし，かつ，接峰面図に類似した最大傾斜量図を作成することで入り組んだ地形を滑らかな地形に変化させる。これによって，入り組んだ境界を持つ山地/平野境界を認識させるが，スケールダウンと最大傾斜量図を用いていることから，抽出した線素の位置がやや不正確になる欠点がある。この欠点は，今後の課題である。

ここではスケールダウンを 1/4 で固定し，最大傾斜量図作成時のメッシュサイズと方向検出オペレータのサイズを変更し，抽出結果の比較を行った。

パラメータは，最大傾斜量図を作成する場合のメッシュサイズ（350，500m の 2 種)，方向検出オペレータのサイズ(1440，1920m の 2 種)，および検索距離(1440m,2880m の 2 種)とし，この組合せによって合計 8 種類について山地/平野直線境界の検出を行った。



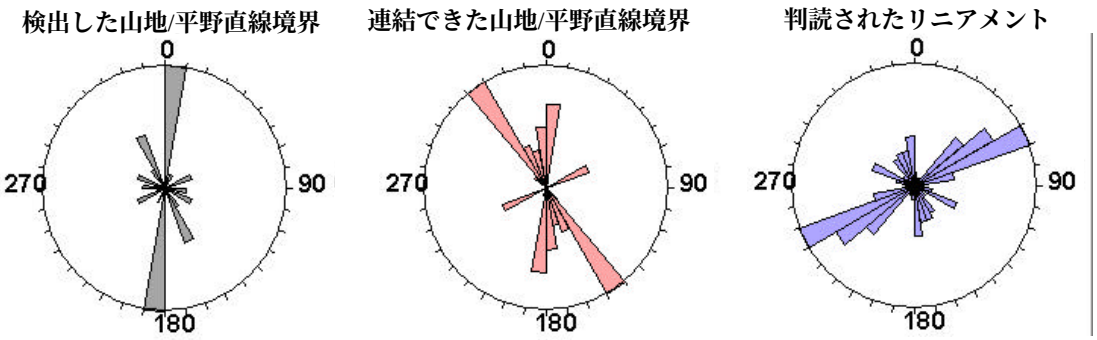
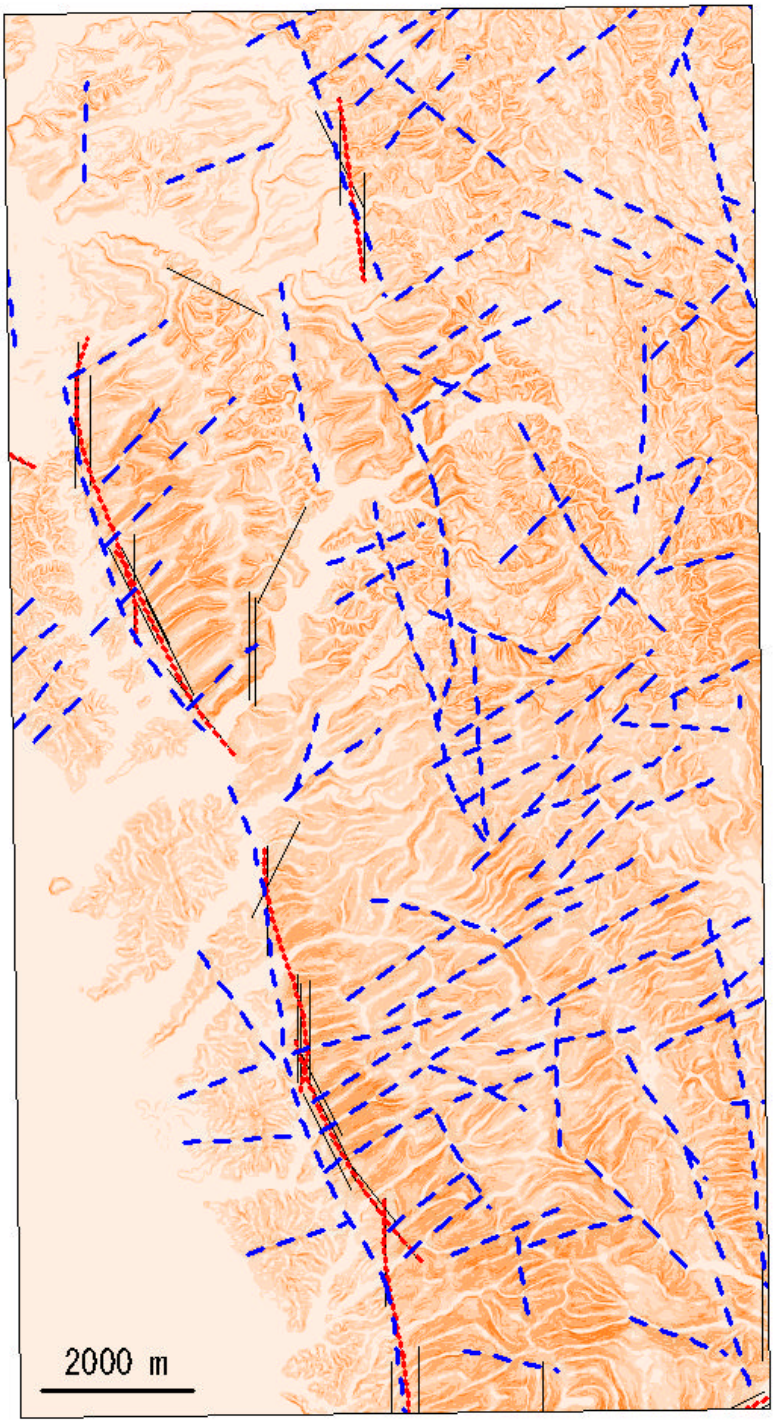


図 3.19 山地/平野直線境界の抽出結果(1) (メッシュ 350m, オペレータ 1440m, 検索距離 1440m)
黒細線 :検出した山地/平野直線境界 赤太線 :連結された山地/平野直線境界
青色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)



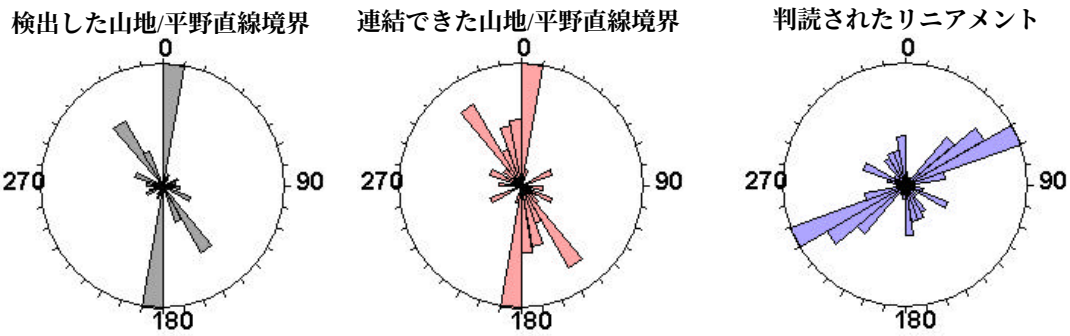


図 3.20 山地/平野直線境界の抽出結果(2) (メッシュ 350m, オペレータ 1440m, 検索距離 2880m)
黒細線 :検出した山地/平野直線境界 赤太線 :連結された山地/平野直線境界
青色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)

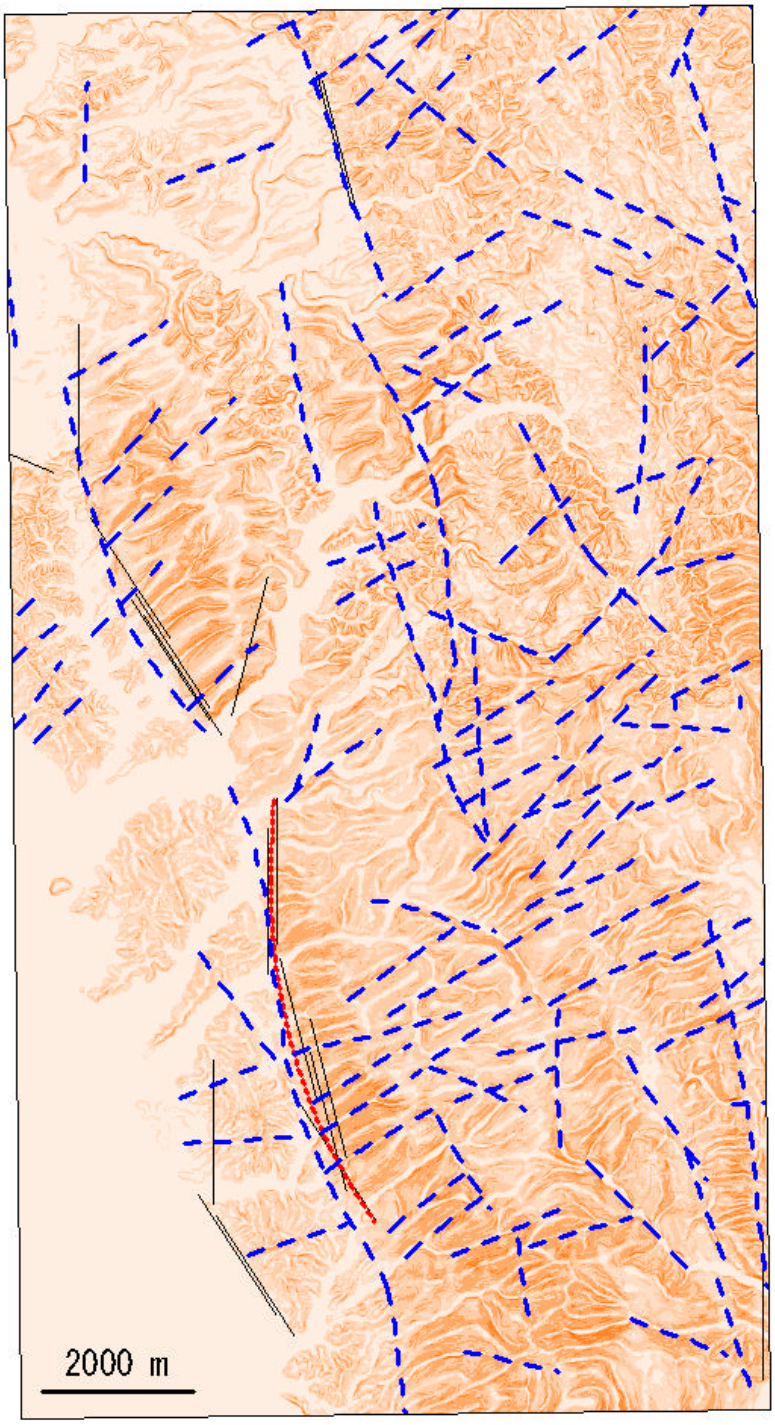
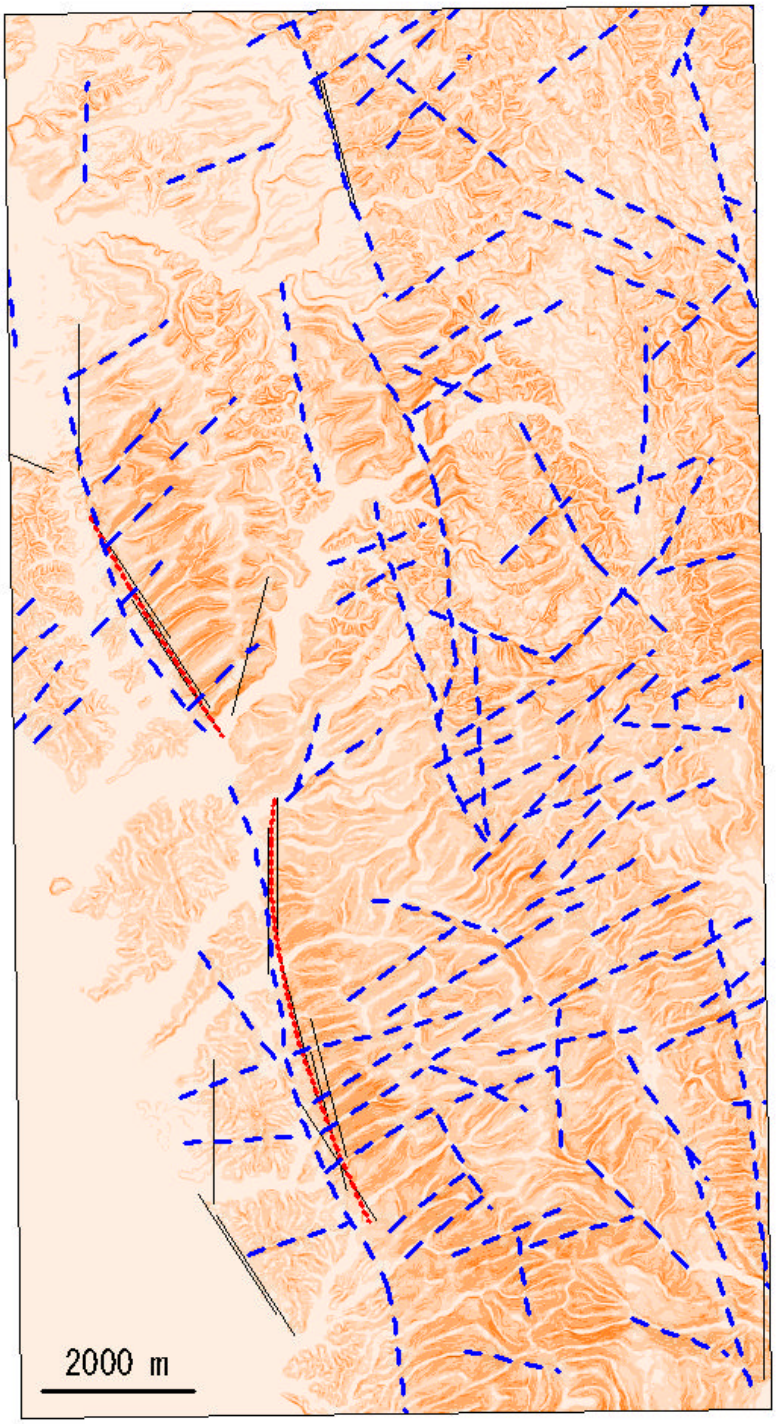


図 3.21 山地/平野直線境界の抽出結果(3) (メッシュ 350m, オペレータ 1920m, 検索距離 1440m)
黒細線 検出した山地/平野直線境界 赤太線 連結された山地/平野直線境界
青色 判読されたリニアメント 北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)



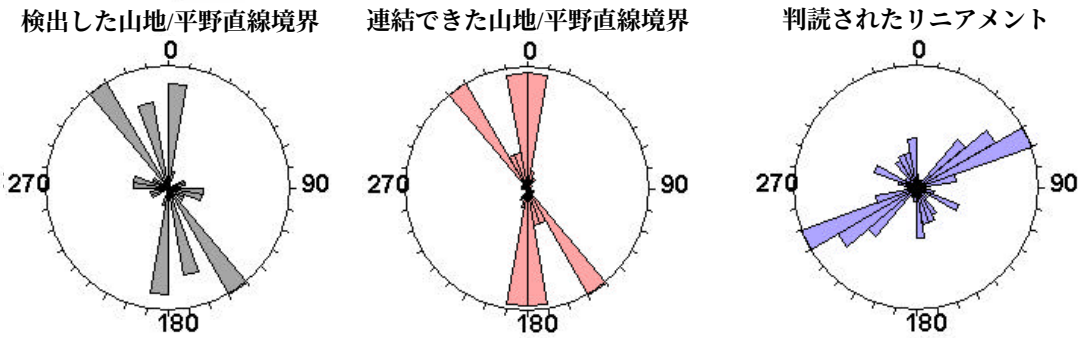
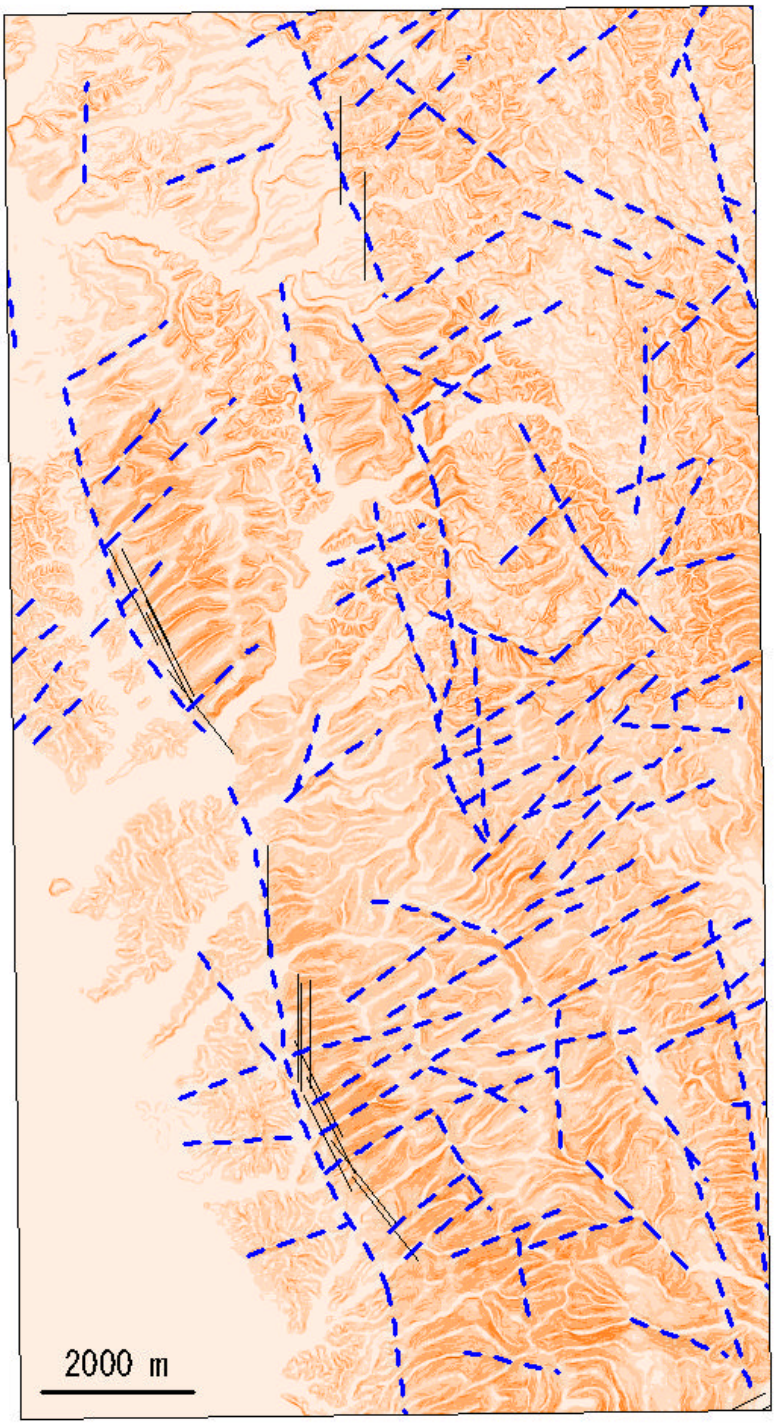


図 3.22 山地/平野直線境界の抽出結果(4) (メッシュ 350m, オペレータ 1920m, 検索距離 2880m)
黒細線 :検出した山地/平野直線境界 赤太線 :連結された山地/平野直線境界
青色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)



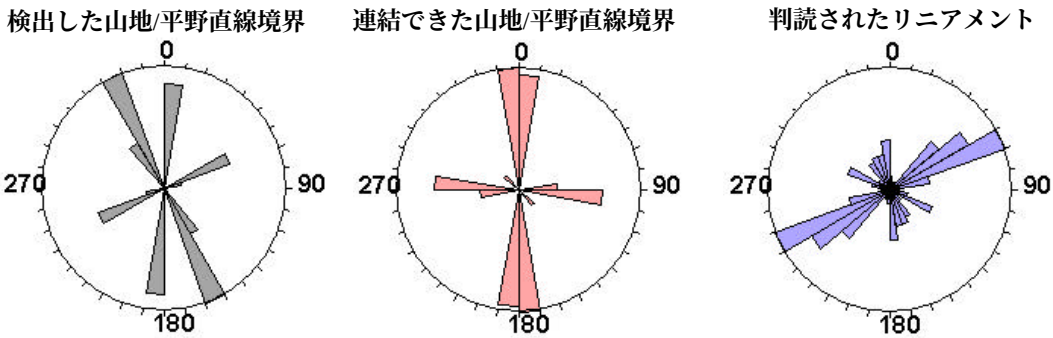


図 3.23 山地/平野直線境界の抽出結果(5) (メッシュ 500m, オペレータ 1440m, 検索距離 1440m)
黒細線 :検出した山地/平野直線境界 赤太線 :連結された山地/平野直線境界
青色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)

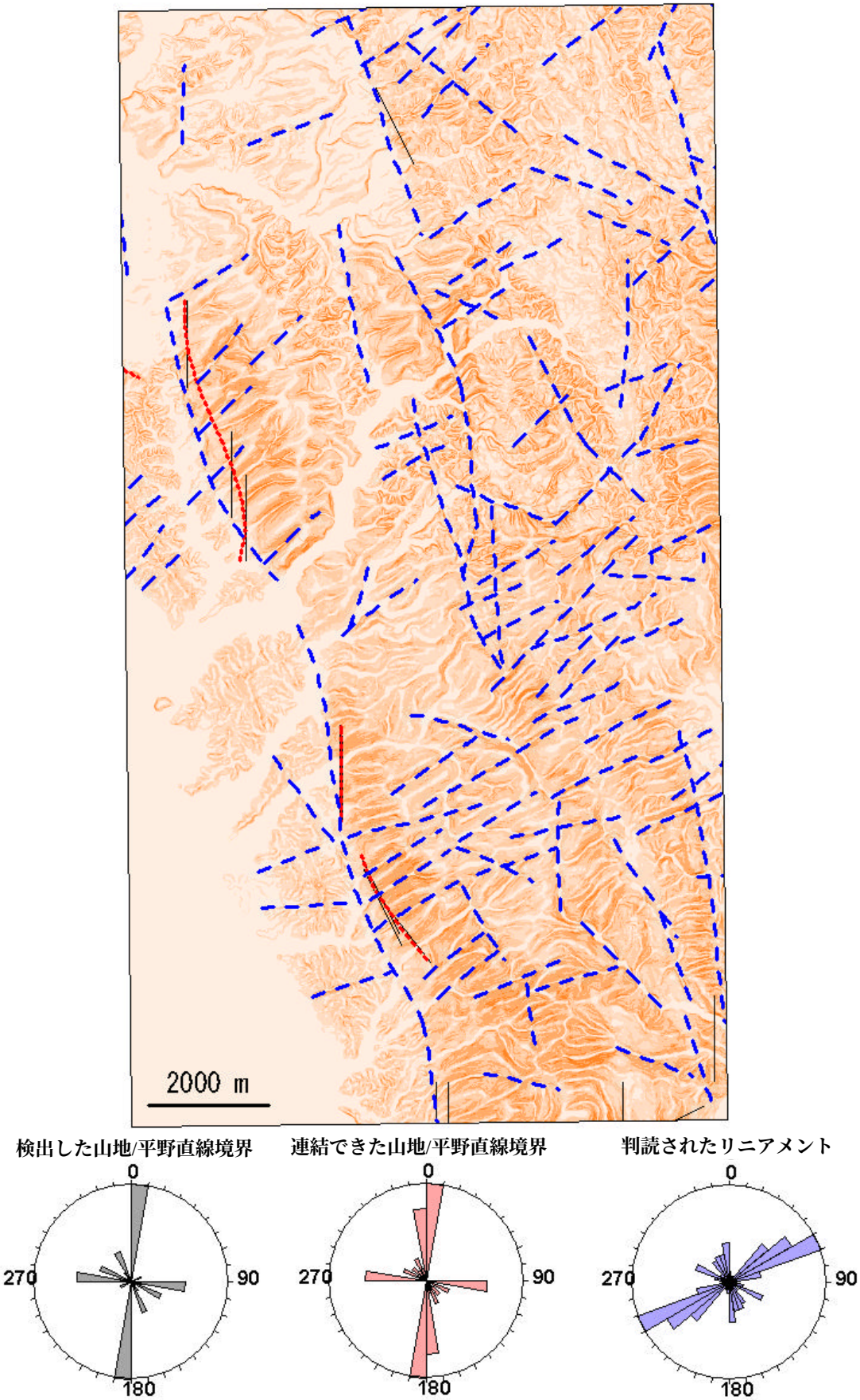
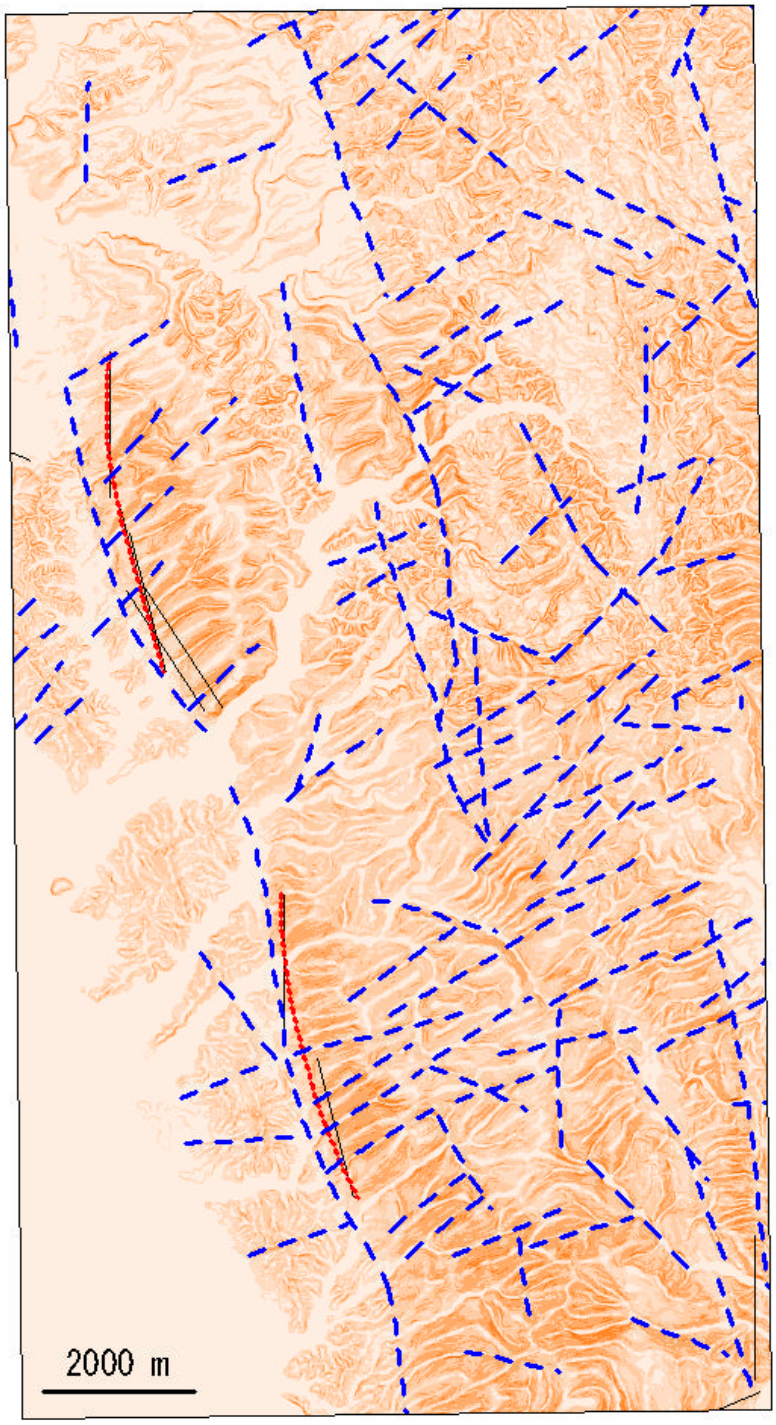


図 3.24 山地/平野直線境界の抽出結果(6) (メッシュ 500m, オペレータ 1440m, 検索距離 2880m)
黒細線 :検出した山地/平野直線境界 赤太線 :連結された山地/平野直線境界
青色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)



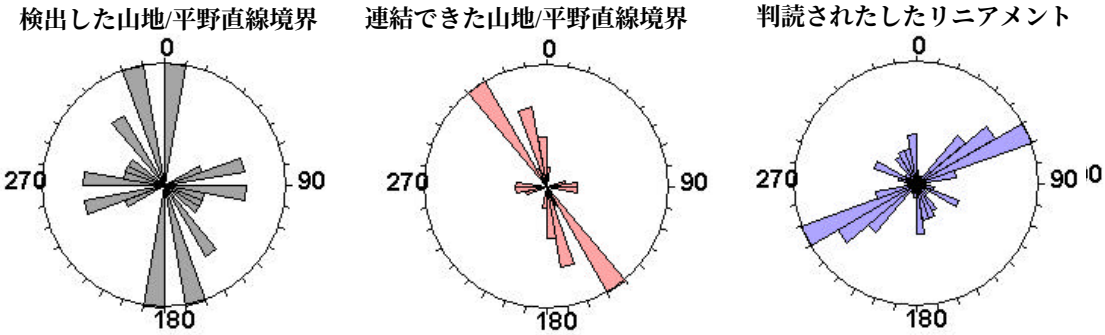
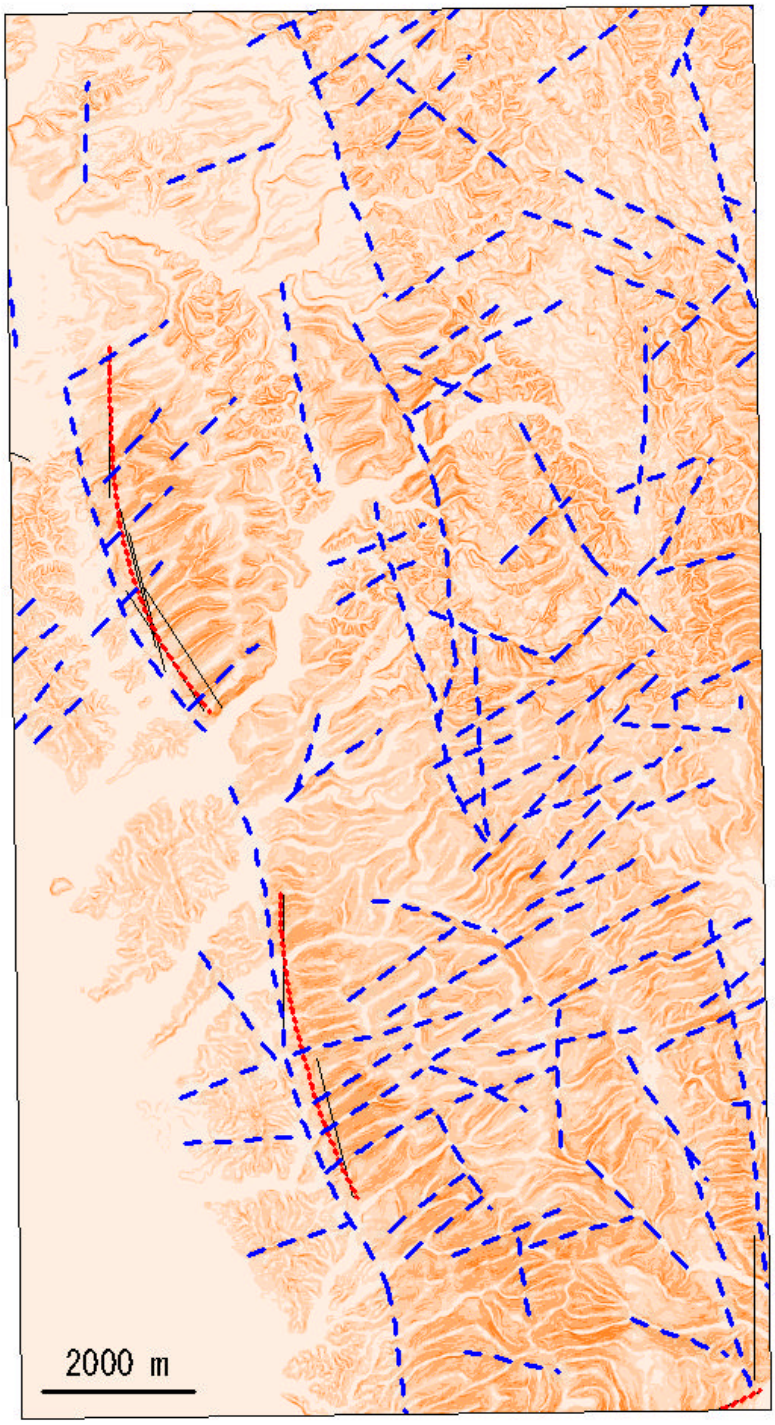


図 3.25 山地/平野直線境界の抽出結果(7) (メッシュ 500m, オペレータ 1920m, 検索距離 1440m)
黒細線 :検出した山地/平野直線境界 赤太線 :連結された山地/平野直線境界
青色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)



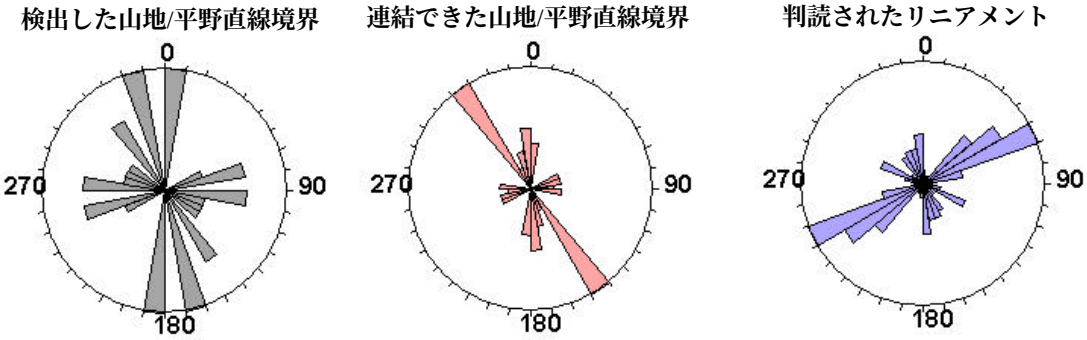


図 3.26 山地/平野直線境界の抽出結果(8) (メッシュ 500m, オペレータ 1920m, 検索距離 2880m)
黒細線 :検出した山地/平野直線境界 赤太線 :連結された山地/平野直線境界
青色 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)

図 3.19～3.26 に，パラメータの組合せを変更した 8 種類の結果を示した。検出された線素は黒の細線で，連結した線素の中点を結んだ 3 次曲線を赤の太点線で，判読したリニアメントを青点線で表した。また，連結された線素の方向特性をローズダイアグラムで示した。線素の位置を検討するため，背景に傾斜量(濃い部分が急傾斜)を合わせて表示した。

山地/平野直線境界の検出は 1,000m を超えるかなり大きめの方向検出オペレータを利用している。このため，対象領域よりも周囲 1,000m 広げた範囲の DEM を利用して処理を行った。検出した線素は対象領域のみを表示しているが，ローズダイアグラムの作成には広げた領域で検出された線素も含めて計算している。したがって，図 3.24 の様に E-W 系の線素は表示されていないが，ローズダイアグラムのみに現れている場合もある。

図 3.19～3.26 に示したように，山地/平野直線境界は大曲断層に相当する地域に検出・連結されている。これら検出・連結された線素群は，N-S～NW-SE 方向に卓越する方向特性を持つ。これに対し，判読されたリニアメントのローズダイアグラムでは，すべてのリニアメントから作成したものであることから，ENE-WSW 方向が卓越している。このローズダイアグラムでは，N-S～NW-SE 方向のリニアメントがやや増加しており，これらは判読されたリニアメントのうち，大曲断層に相当するリニアメントと，この東側に位置するこれと平行したリニアメント群に対応する。

図 3.19～3.26 を探索距離の差で比較すると，探索距離が長いケースで連結される線素が多くなっている。したがって，山地/平野直線境界を検出する場合では，やや長目の検索距離(ここではオペレータサイズの 2 倍)を与えた方が良いようである。

また，オペレータサイズを大きくすると，山麓線をより直線的に結ぶようになる。3.5 項で述べたように，大曲断層を横切る流路間隔は約 400m である。したがって，方向検出オペレータのサイズはこれら河川をまたぐ必要があり，3 河川程度からその直線性を判断することが望ましい。したがって，1200m 程度が予想されるオペレータサイズとなる。

最大傾斜量図を作成する際のメッシュサイズは，細かな谷を埋設する必要があることから，流路間隔程度がメッシュサイズとして適当である。したがって，大曲断層に注目した場合には，400m 程度のメッシュサイズが適当であると予想される。

したがって，これらの条件に近い図 3.20（メッシュサイズ=350m，方向検出オペレータ=1440m，検索距離=2880m）がパラメータとして妥当であることになる。

図 3.20 とこれ以外の結果を比較すると，図 3.20 の検出および連結がもっとも長く，また，地形の曲がりに沿って線素が検出されている。以上から図 3.20 に利用したパラメータを用いて検出・連結した線素を利用するものとした。

以上述べたように，この山地/平野直線境界の検出方法はあまり論理的ではなく，その地域に認められる地形特徴からパラメータを定義しなければならない。また，異なる地形特徴からなる山地/平野直線境界が同一地域に複数ある場合もあり得る。したがって，いくつ

かのパラメータを準備しておき，いくつかの結果から取捨選択することも考えられるが，これも恣意的であるといわざるを得ない。

　この検出方法については，今後検討する必要がある。

3.8　線素の連結（予備解析）

以上，述べたように３つの方法によってリニアメントを構成する線素を検出することができた。抽出された線素は，

①平野部を除き，直線近似できる長さに切断した流路情報

②傾斜変換線で検出した線素のうち，連結された線素

③山地/平野直線境界で検出された線素のうち，連結された線素(実際には 3 次曲線へ変換した線素を利用)

である。なお，③は連結後，3 次曲線に近似されていることからリニアメント抽出結果にかなり近い情報となっており，①，②とはデータの質が異なっている。

線素連結は以下の手順で実行する。

①直線近似可能な状態に切断された流路同士の方向・位置関係から線素の連結を行う。この連結は 1 回のみとし，連結された線素をグループとする。

②連結されたグループに②と③のグループを加え，これらグループを成長させるものとする。

③グループの成長は，グループ同士の連結と，グループと①で利用した流路情報(①で連結された線素は除外する)の連結とする。

④グループ同士，およびグループと流路情報で連結と成長を繰り返す。繰り返しによって連結される線素数は減少し，連結されるデータが無くなった状態を終了状態とする。

線素の連結は 3 種類の検索距離と 3 種類のふらつき幅を設定し，合計 9 種類について検討を行う。これら連結されたグループについて，次のステップでスコアリングを行い，閾値以上となるスコアを得たグループをリニアメントとして篩い分ける。この時，スコアリングの項目間の重みはの組合せは 20 種近いケースとなる。したがって，9 種の線素の連結結果と，スコアリング方法の 20 種の組合せを考える必要から，合計 180 通りの結果について検討を加えなければならない。これではケース数が多くなりすぎ検討しにくい。

ここでは 1 つの連結結果を利用して，先にスコアリング方法の検討を行うものとした。その後，決定した項目のスコアリング重みを用いて，線素連結のパラメータを調整するものとした。

連結に使用したパラメータは検索距離 60 メッシュ(最大値)，ふらつき許容幅 6 メッシュ(片側 60m)としたものを利用した。なお，ふらつき許容幅については 3.10 項で後述する。このパラメータで線素の連結を行うと図 3.27 が得られる。この時連結されたグループ総数は 1,697 本であり，グループ平均長は 686m である。なお，最短は 14m，最長は約 5.3km であった。

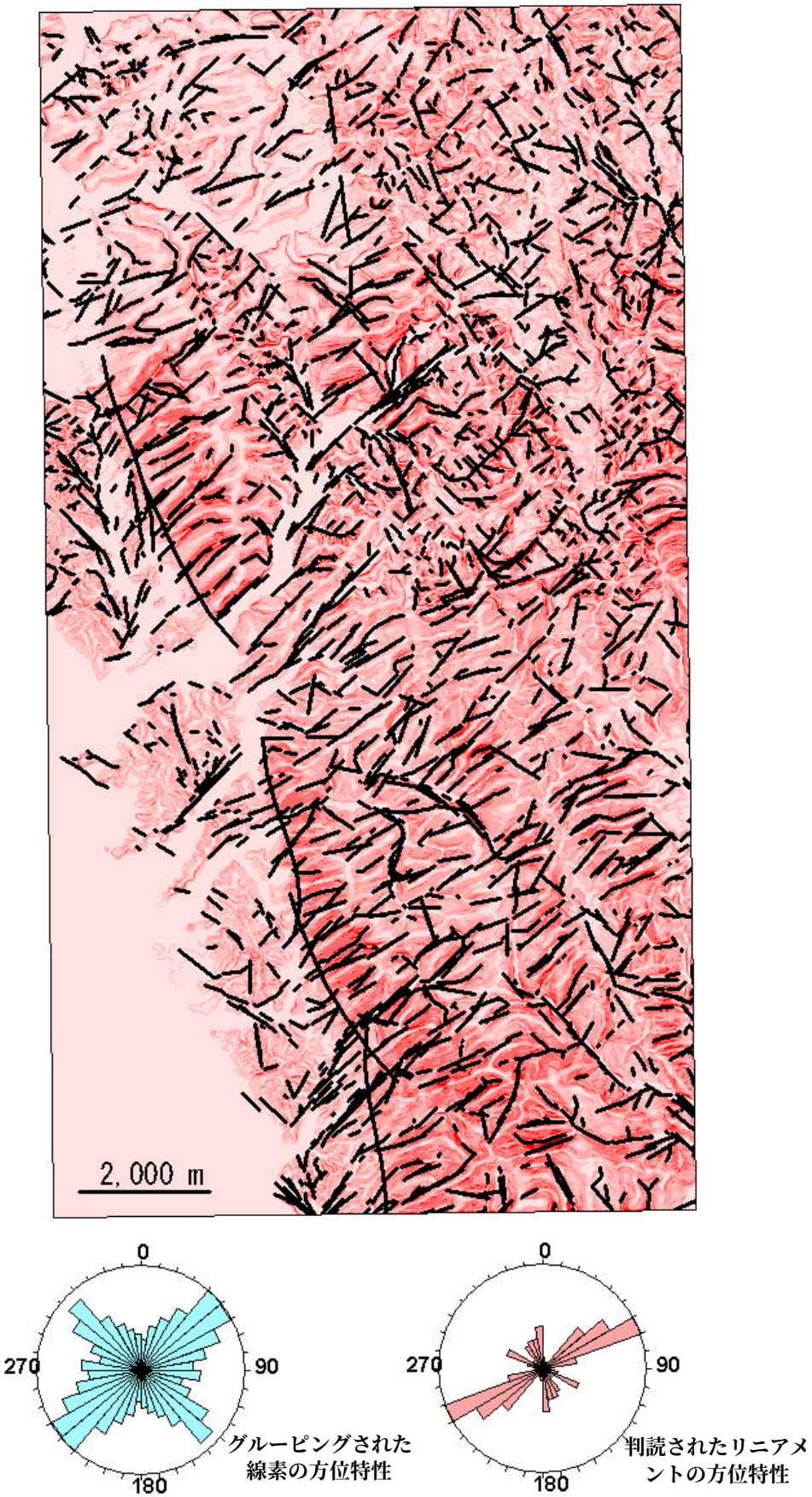


図 3.27 スコア評価に利用したグループデータ (n=1,697)
最大検索距離=600m ふらつき許容幅=60m 検索領域頂角=25°
黒実線 :連結されたグループの構成線素

3.9　項目間のスコアリング重みの検討

前項で述べたようにここで利用したケースは,

①最大検索距離　60 メッシュ(600m)

②ふらつき量　　6 メッシュ(片側 120m)

④許容角(頂角)　25°

である。

スコアリング項目毎のスコアは 1～6 の値を与え，その基準は 2.8 項で述べた方法によるものとした。すなわち,

①地形特徴：構造弱線の候補毎に，構造弱線の直交方向のラプラシアンを計測し，候補全体の平均値・分散を計算する。構造弱線の候補毎にについて標準偏差 0.5 刻みで 1～6(数値が大きいと谷が深い)のスコアを与える。なお，傾斜変換線や山地/平野直線境界は平均値となる 3 を与える。

②グループ方位：方位別の構造特性値を 0.2 刻みに分類し，1～6(数字が大きいと強い構造規制のある方向，1 は通常主構造と直交する方向)でスコアを与える。

③グループ長：構造弱線の候補の長さを計算し，平均長を算出する。平均的な長さを 3 として，標準偏差 0.5 刻みで分類し，1～6(数字が大きいと長い)でスコアを与える。

④線素構成比：グループを構成する線素長を合計し，グループ長に占める構成比を計算する。スコアは構成比 0.6 以上(線素合計長がグループ長の 60%以上)を 6 とし，以下 0.1 刻みで 1～6 のスコアを与える。

⑤グループ長が平均値の半分以下であるグループは，必要長を達していないものとし，スコア計算から除外する。

である。

以上の方法で項目毎にスコアリング後，項目間の重みの検討を行った。検討した項目間の重みは以下である。図 3.28～3.36 に抽出結果を示した。なお，スコアを篩い分ける閾値は，グループ総数 1,697 本の上位 10%が篩い分けられる値とした。

表 3.3　項目間の重みの検討

ケース	1	2	3	4	5	6	7	8	9
地形特徴	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0	1.0
方位	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5
長さ	1.0	1.0	2.0	1.0	1.0	2.0	1.0	2.0	2.0
構成比	1.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	1.0	1.5

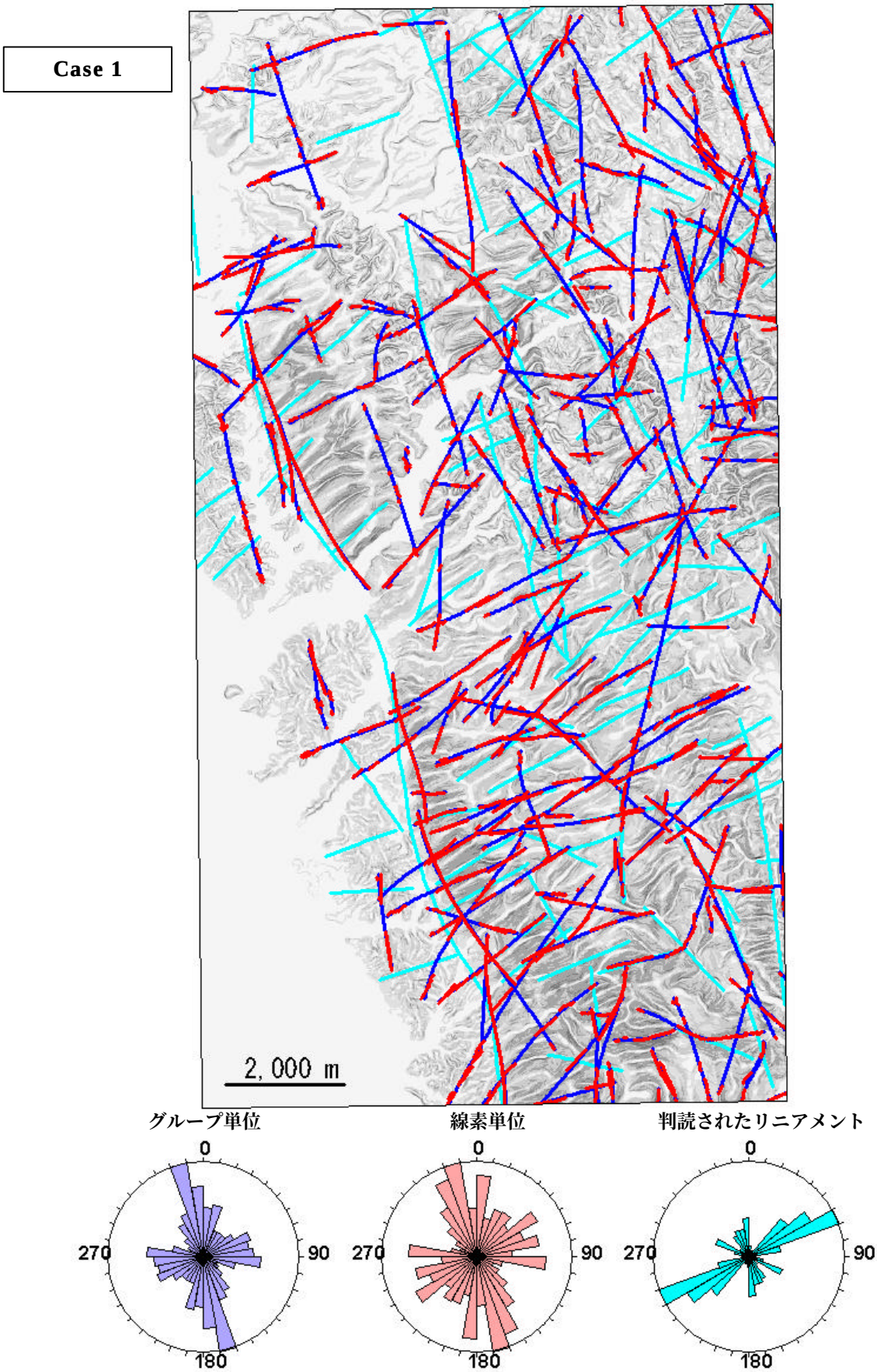


図 3.28 項目のスコア重み Case 1 赤 :線素 青 :グループ 水色 :判読されたリニアメント)
Case 1 地形特徴=1.0 グループ方位=1.0 グループ長=1.0 線素構成比=1.0

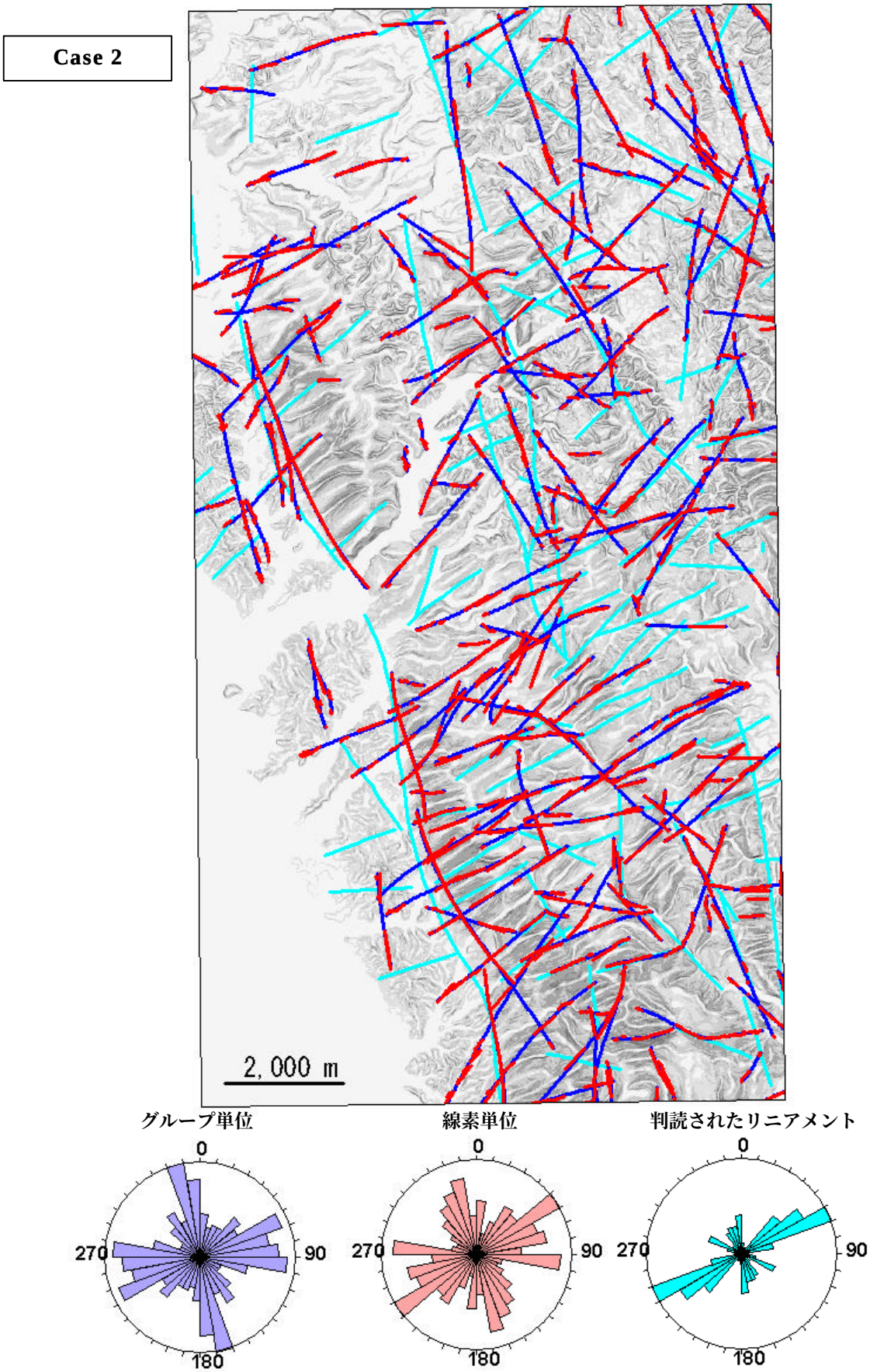
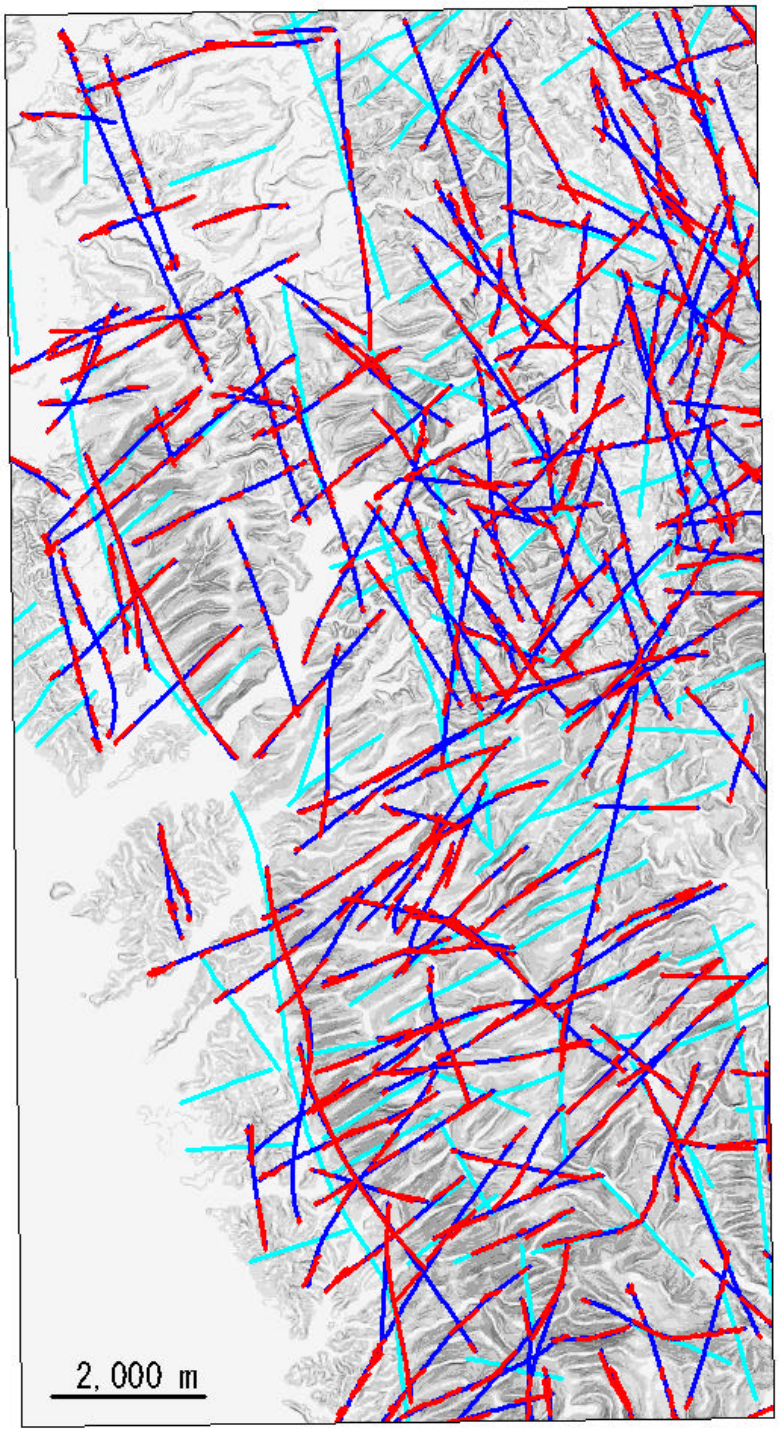


図 3.29 項目のスコア重み Case 2 赤 線素 青 :グループ 水色 :判読されたリニアメント)
Case 2 地形特徴=1.0 グループ方位=1.0 グループ長=1.0 線素構成比=2.0

Case 3



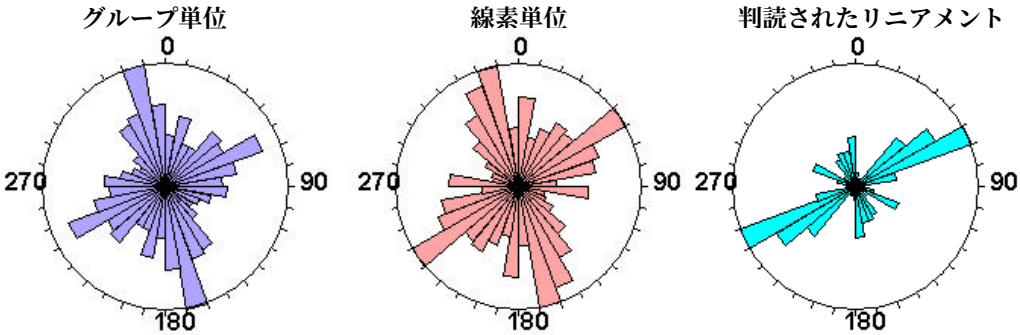


図 3.30 項目のスコア重み Case 3 (赤:線素 青:グループ 水色:判読されたリニアメント)
Case 3 地形特徴=1.0 グループ方位=1.0 グループ長=2.0 線素構成比=2.0

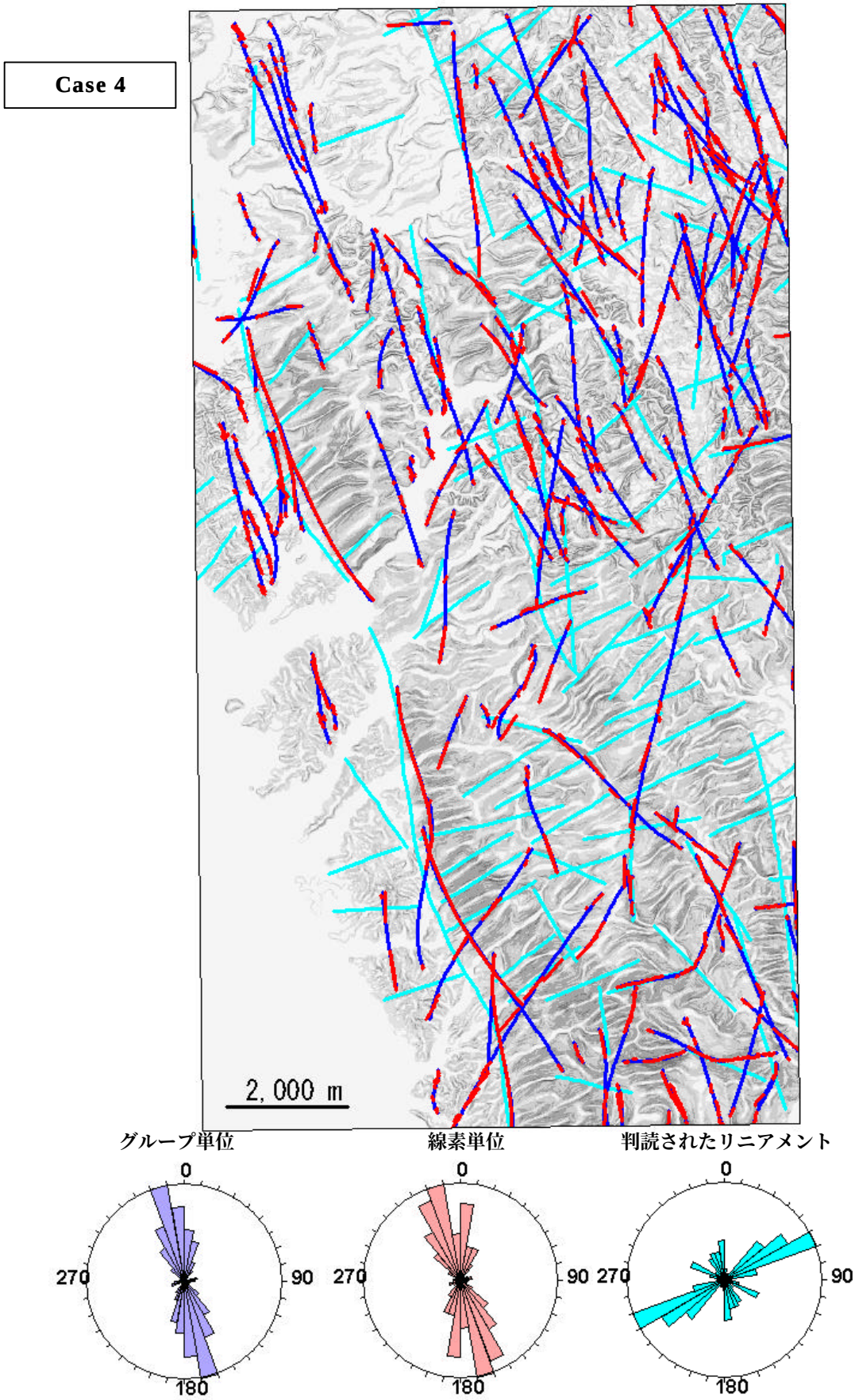
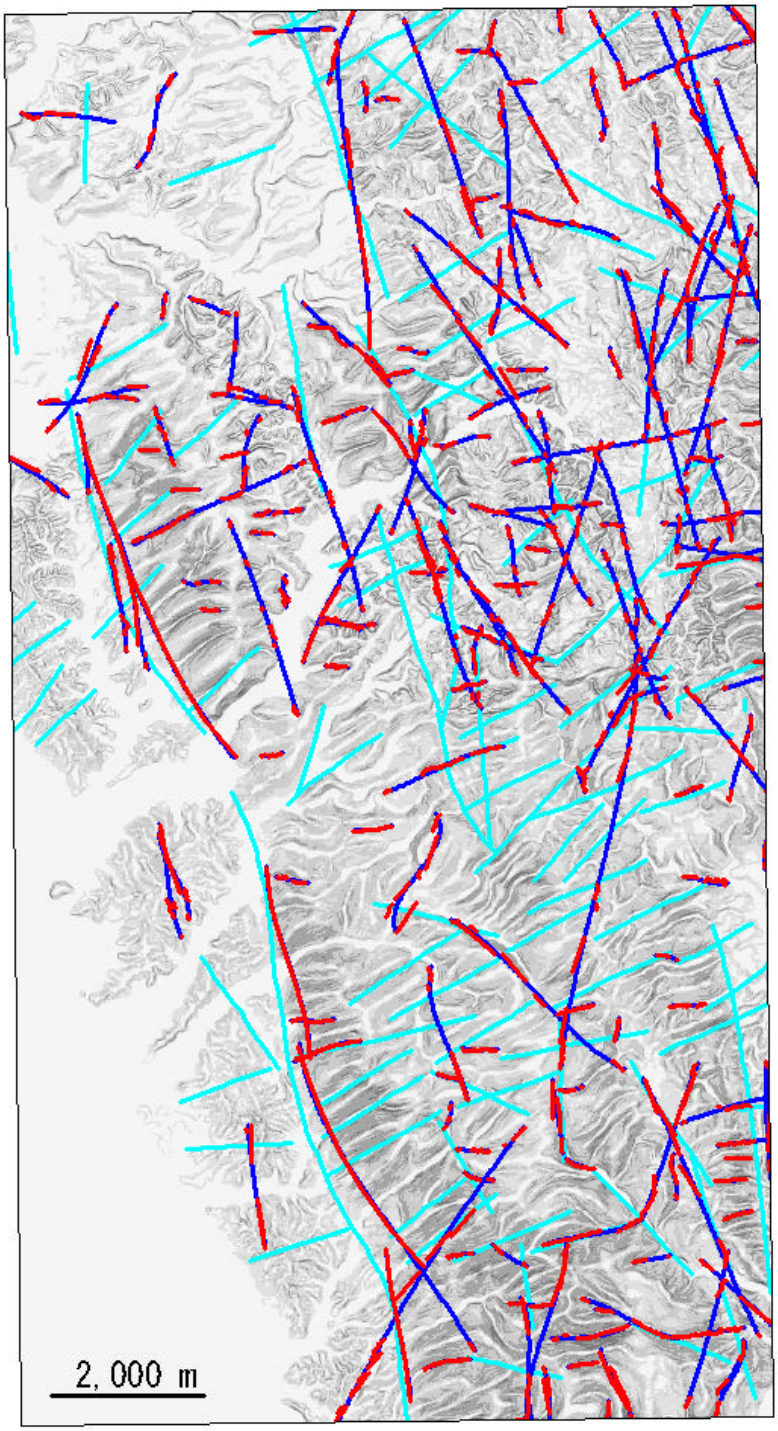


図 3.31 項目のスコア重み Case 4 赤 :線素 青 :グループ 水色 :判読されたリニアメント)
Case 4 地形特徴=1.0 グループ方位=2.0 グループ長=1.0 線素構成比=1.0

Case 5



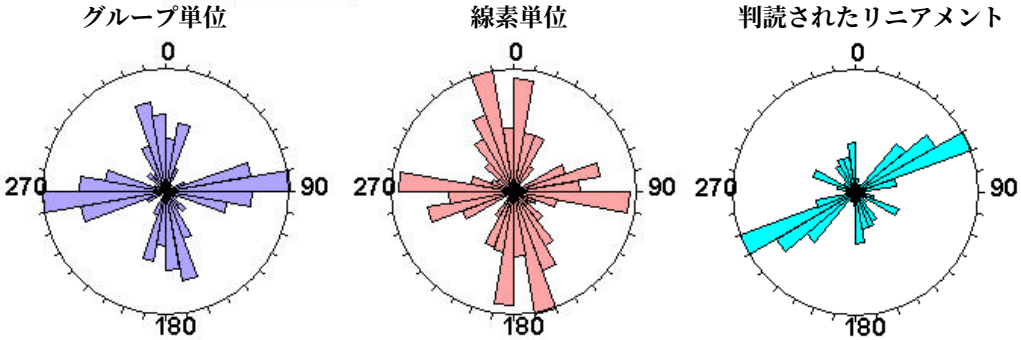
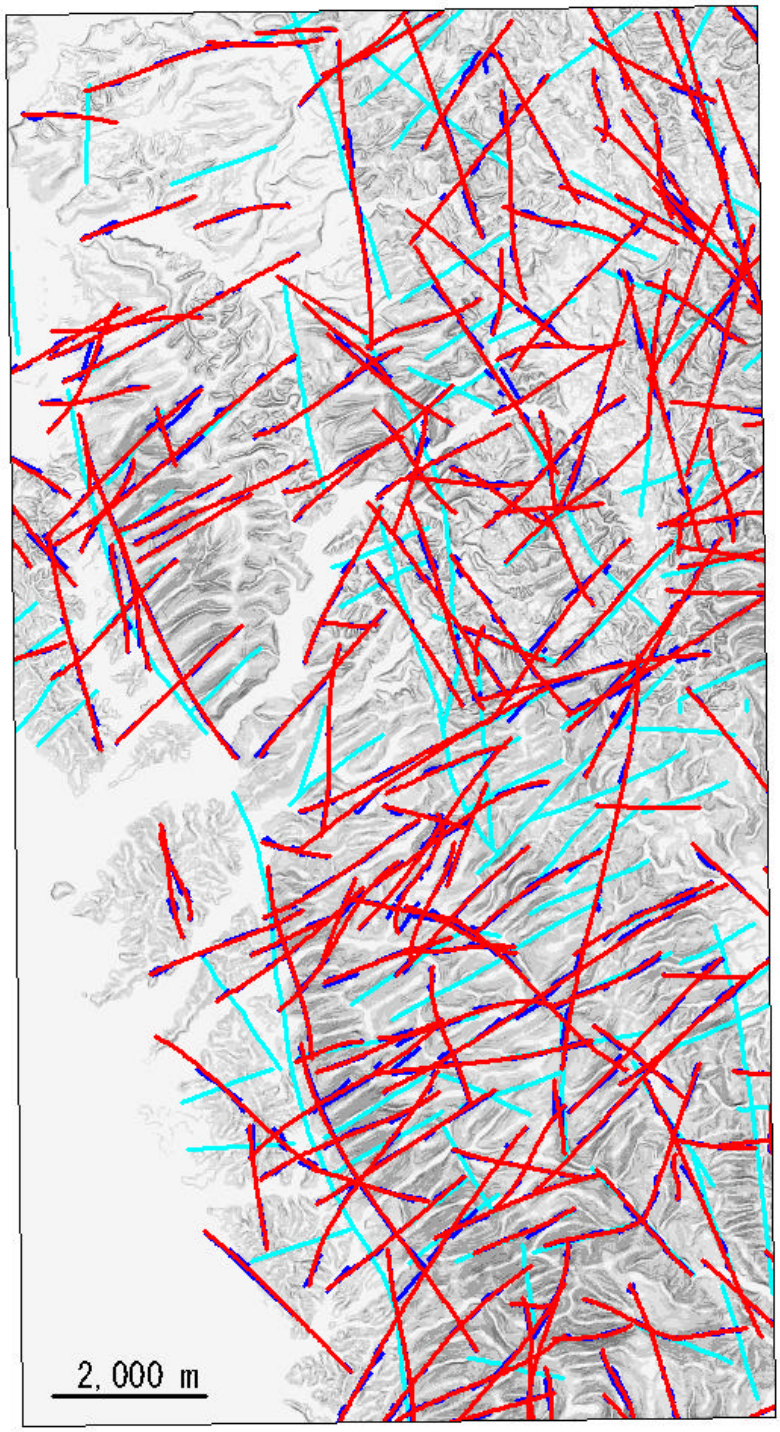


図 3.32 項目のスコア重み Case 5 赤 :線素 青 :グループ 水色 :判読されたリニアメント)
Case 5 地形特徴=2.0 グループ方位=1.0 グループ長=1.0 線素構成比=1.0

Case 6



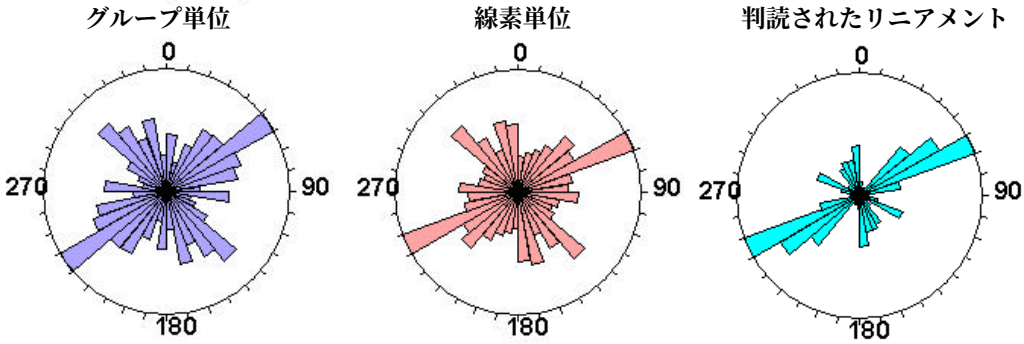
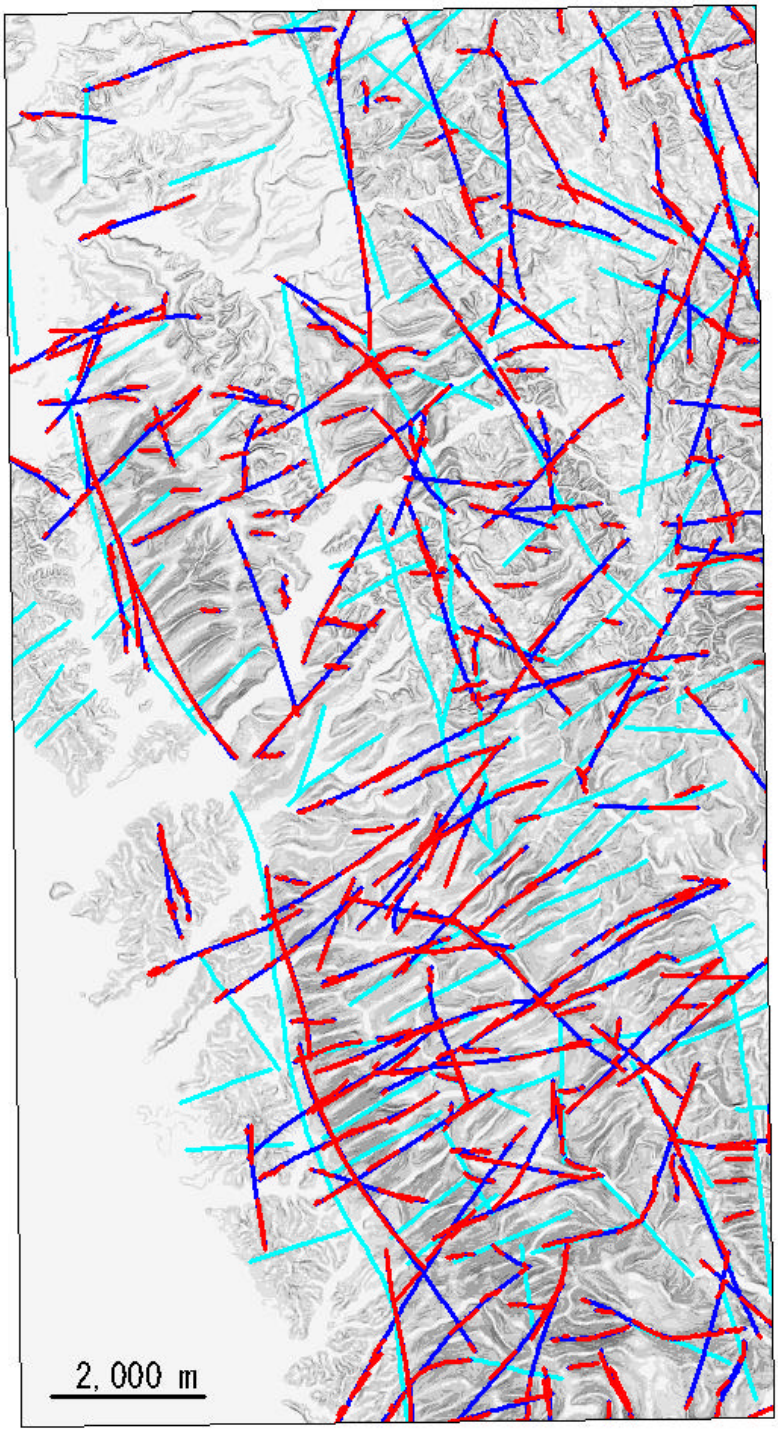


図 3.33 項目のスコア重み Case 6 (赤:線素 青:グループ 水色:判読されたリニアメント)
Case 6 地形特徴=1.0 グループ方位=1.0 グループ長=2.0 線素構成比=2.0

Case 7



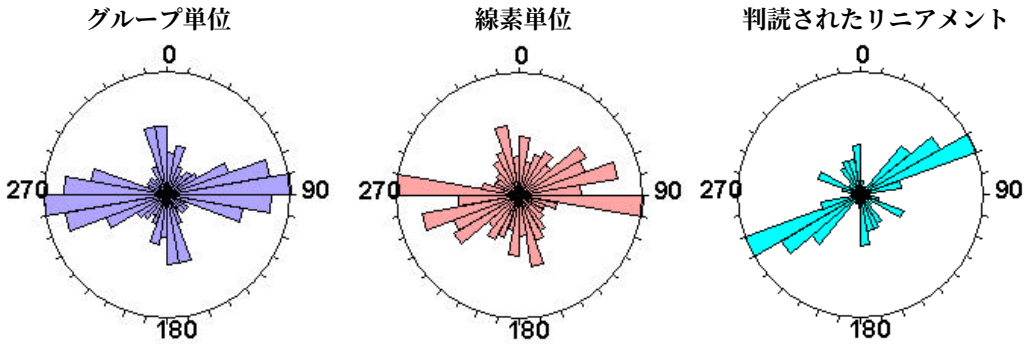
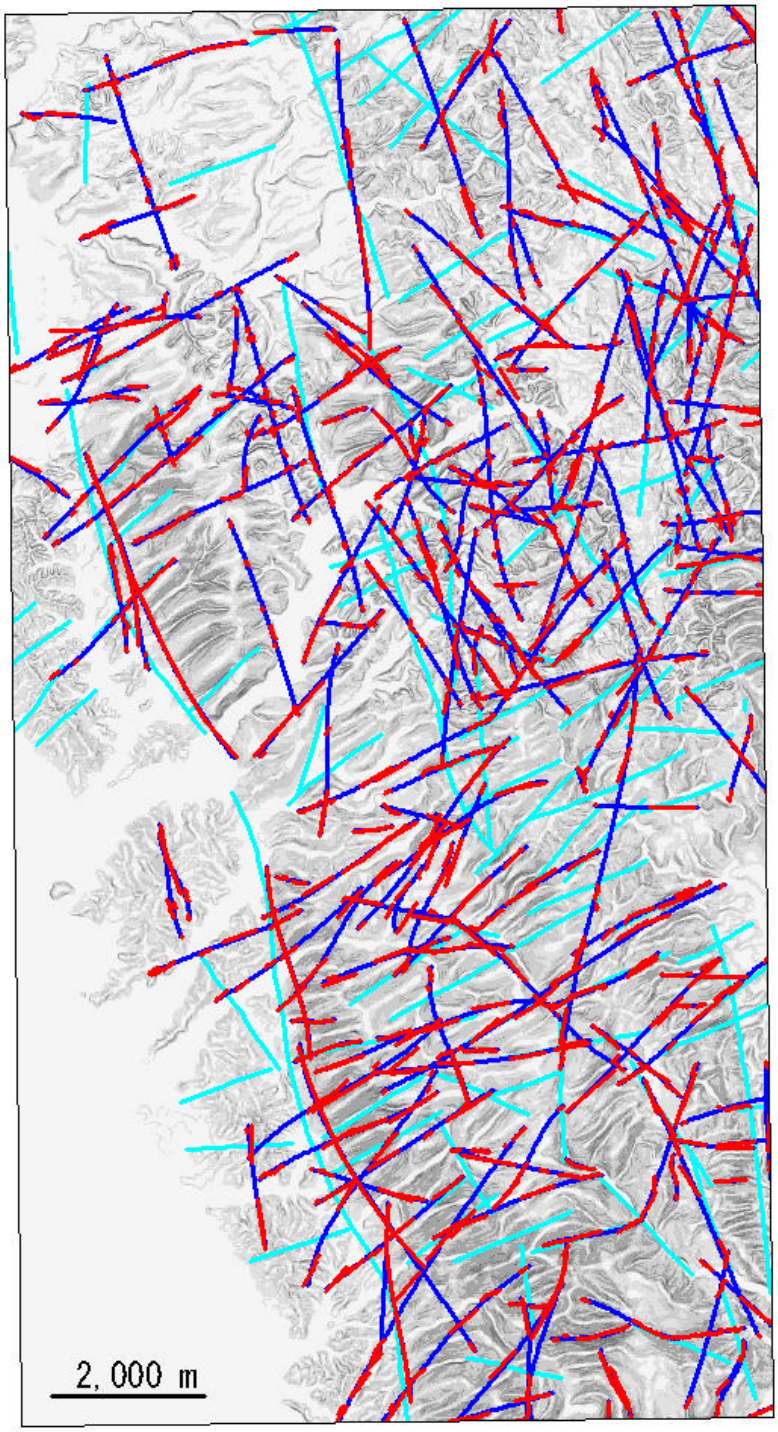


図 3.34 項目のスコア重み Case 7 赤 :線素 青 :グループ 水色 :判読されたリニアメント)
Case 7 地形特徴=2.0 グループ方位=1.0 グループ長=1.0 線素構成比=2.0

Case 8



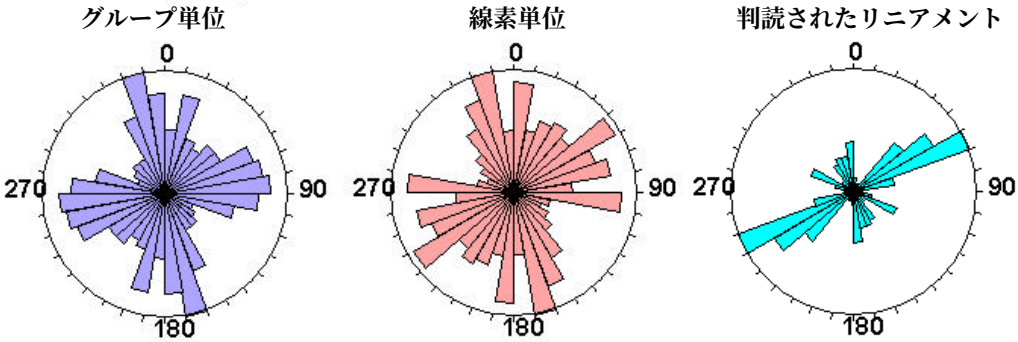


図 3.35 項目のスコア重み Case 8 赤 :線素 青 :グループ 水色 :判読されたリニアメント)
Case 8 地形特徴=2.0 グループ方位=1.0 グループ長=2.0 線素構成比=1.0

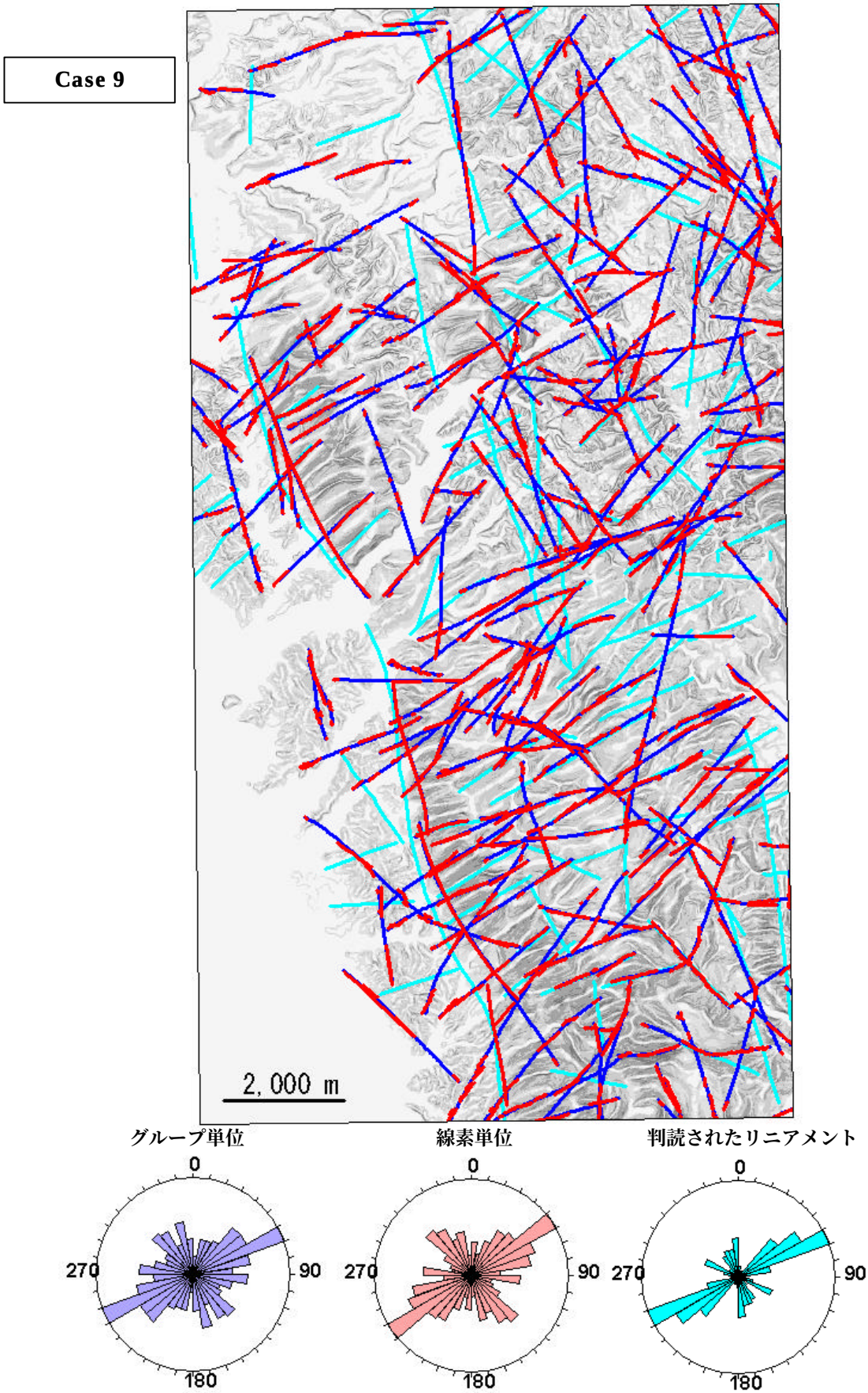


図 3.36 項目のスコア重み Case 9 赤 :線素 青 :グループ 水色 :判読されたリニアメント)
Case 9 地形特徴=1.0 グループ方位=0.5 グループ長=2.0 線素構成比=1.5

表 3.4 項目の重みを変化させて抽出したグループと
判読したリニアメントとのローズダイアグラムによる比較

ケース	図番	地形特徴	方位	長さ	構成比	閾値	抽出数	ローズダイアグラムの類似性
1	図 3.28	1.0	1.0	1.0	1.0	16	216	卓越方向が異なる
2	図 3.29	1.0	1.0	1.0	**2.0**	21	220	NNW-SSE が卓越しすぎる
3	図 3.30	1.0	1.0	**2.0**	1.0	21	225	NNW-SSE が卓越しすぎる
4	図 3.31	1.0	**2.0**	1.0	1.0	18	178	ENE-WSW が発達しない
5	図 3.32	**2.0**	1.0	1.0	1.0	19	199	卓越方向が異なる(E-W 強い)
6	図 3.33	1.0	1.0	**2.0**	**2.0**	26	232	卓越方向類似，NW-SE もやや類似
7	図 3.34	**2.0**	1.0	1.0	**2.0**	25	244	卓越方向が異なる(E-W 強い)
8	図 3.35	**2.0**	1.0	**2.0**	1.0	24	225	NNW-SSE が卓越しすぎる
9	図 3.36	1.0	**0.5**	**2.0**	**1.5**	22	230	卓越方向類似，NW-SE もやや類似

表 3.4 は抽出されたリニアメントと判読したリニアメントのローズダイアグラムの類似性を比較した表である。方位特性の重みを大きくすると，構造卓越方向である N-S 系のグループが卓越し，判読したリニアメントと方位特性が大きく異なる結果となった。また，地形特徴の重みを大きくすると大曲断層東側の水系からグルーピングされる E-W 系リニアメントが卓越し，この場合も判読したリニアメントの方位特性と異なったものとなる。

判読したリニアメントのローズダイアグラムと比較的類似するケースはケース 6 および 9 があり，これらは長さおよび線素構成比を大きくしたケースである。したがって，連結長が長く，また，直線状流路や傾斜変換線などの地形特徴が長く認められるグループほど，判読されるリニアメントに類似した方向特性を持つと言える。なお，ケース 6 と 9 を比較すると，方位特性の重みを 0.5 と低くしたケースがより判読結果のローズダイアグラムと類似した方位特性をもっている。従って，ここではケース 9 の項目間重みを利用するものとした。

図 3.28～3.36 で示したように項目間の重みは，抽出結果の方位特性を大きく変化させる。これに対し，傾斜変換線や山地/平野直線境界，あるいは次項で述べる線素の結合では検討すべきいくつかのパラメータはあるものの，抽出される線素，あるいは連結されたグループの方位特性を大きく変更するものではない。したがって，地域が変化してもこれらパラメータによる結果の変化は大きなものではないと考えられる。

項目間の重みが地域によらず概ね一定であるか，あるいは地域特性によって変化するものであるかは，今後より広い範囲を対象として検討する必要がある。

なお，今回のケース 9 では，方位特性に 0.5 と小さな値を乗じている。対象地域の地形構造特性値は N-S～NNW-SSE 方向で 2.0(図 3.6)と算出されており，2.8 項で述べたスコアリング方法では 5 と計算される。したがって項目の重み 0.5 を乗ずると，スコアが最も小さい E-W 方向では 0.5，スコアが最も大きい N-S 方向で 2.5 となりその差は 2.0 となる。したがって，方位特性の獲得スコアに対する影響は小さいものとなっている。なお，この方向特

性は線素連結時にすでに考慮されていることから，項目に入れる必要がないかもしれない。

図 3.37～3.43 は獲得スコア毎の線素の分布と方位特性を示した。図 3.37 はグループ平均長の半分以下となるグループを示したものであり，リニアメントとするには短すぎることから，スコアリングの対象外としたグループである。これらは抽出されたグループの約 40%に達する。

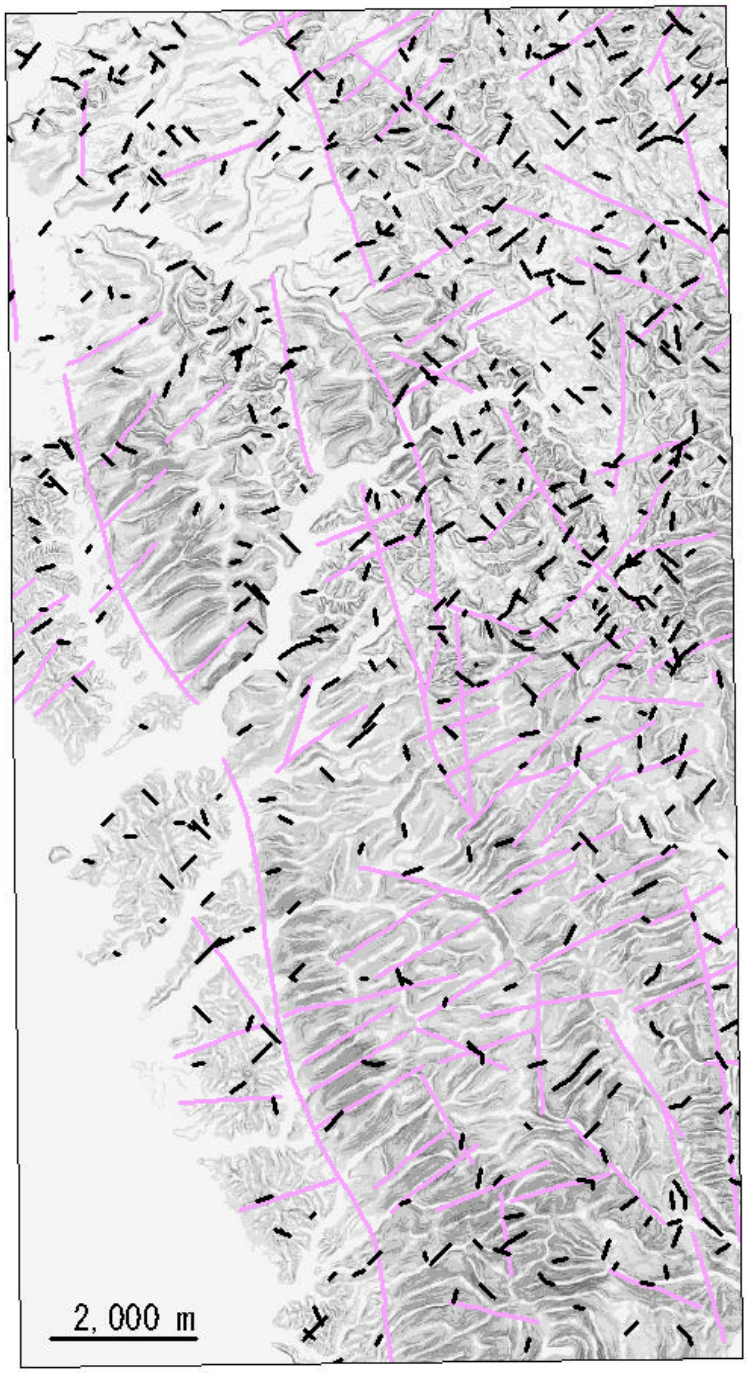
獲得スコアが高くなる図 3.40～3.42 では，NE-SW 方向が卓越する図 3.39 までと較べ，ENE-WSW 方向へ卓越方向が変化している。また，図 3.41, 3.42 ではこの卓越方向に加え，N-S から NW-SE 方向のリニアメントが増加している。

スコアが最も高い図 3.43 では，リニアメント数が 43 と少ないが，N-S から NNW-SSE 方向の地形構造に沿ったリニアメントが増加している。したがって，スコアの高いリニアメントは，断層などの構造で抽出されたものである可能性が高いことを示している。

スコア値によって分類したリニアメントの方位特性が，ある閾値を境として大きく変化するならば，獲得スコアから閾値を決定することができる。しかしながら獲得スコアに応じてリニアメントの卓越方向は徐々に変化しており，スコアリング値とリニアメントの方向特性から，リニアメントを篩い分ける閾値を決定することはできない。

図 3.44 は，抽出されたグループ総数 1,697 本についてケース 9 の重みからスコアリングを行い，獲得スコアの上位から並べ替え，上位 5%，10%を閾値として篩い分けた抽出結果を表している。なお，獲得スコアは実数型で計算しているが，最終的なスコアは整数化して用いている。したがって，同じスコアとなるグループは複数存在し，閾値以上となるグループ数は正確に 5%，10%とはならない。

閾値を 5%，10%と変化させても，図 3.44 のローズダイアグラムにはほとんど変化が現れない。ただし，上位 10%では抽出されるリニアメント数が多いため解析結果が見にくくなる。ここでは上位 5%をリニアメントとして篩い分ける閾値とした。



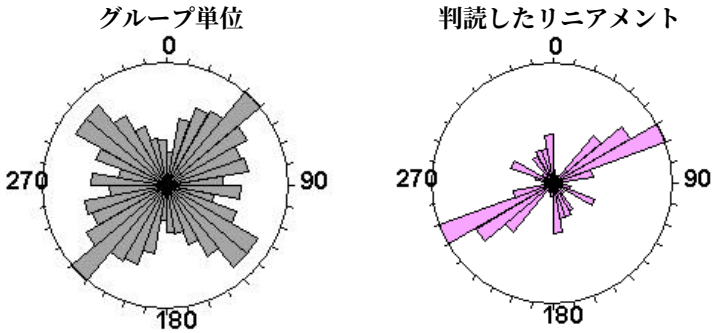
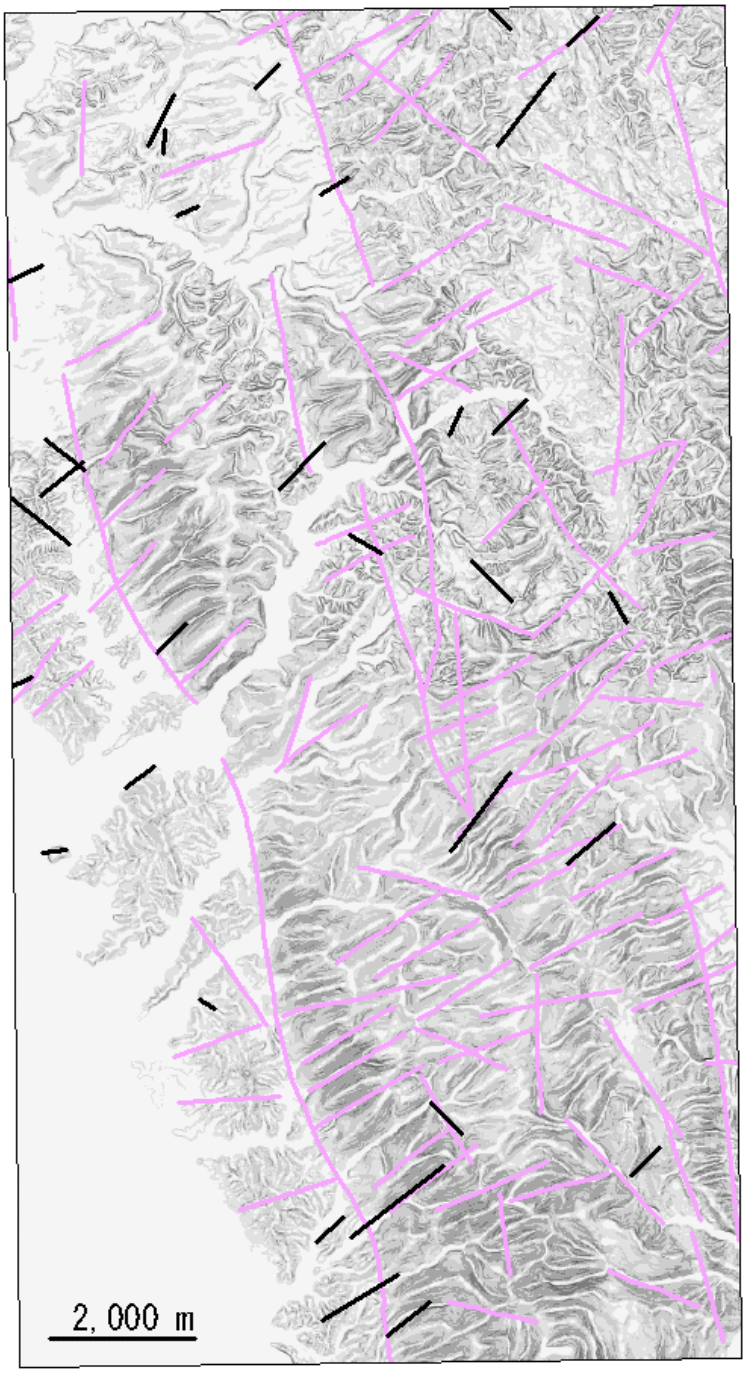


図 3.37 獲得スコアによるグループ（黒）の分布と方位特性［グループ長が定義に達しない］
グループ長の閾値＝グループ平均長の半分以下（295m） n=670



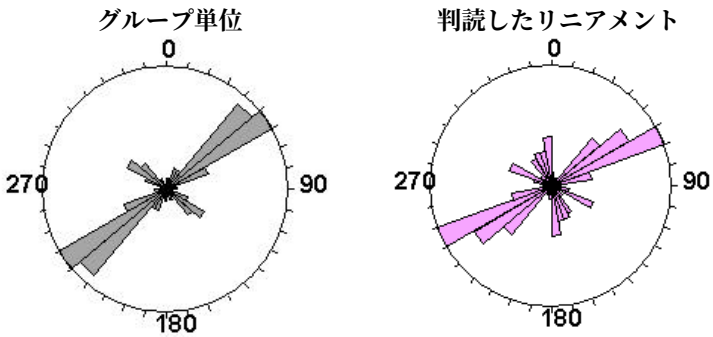
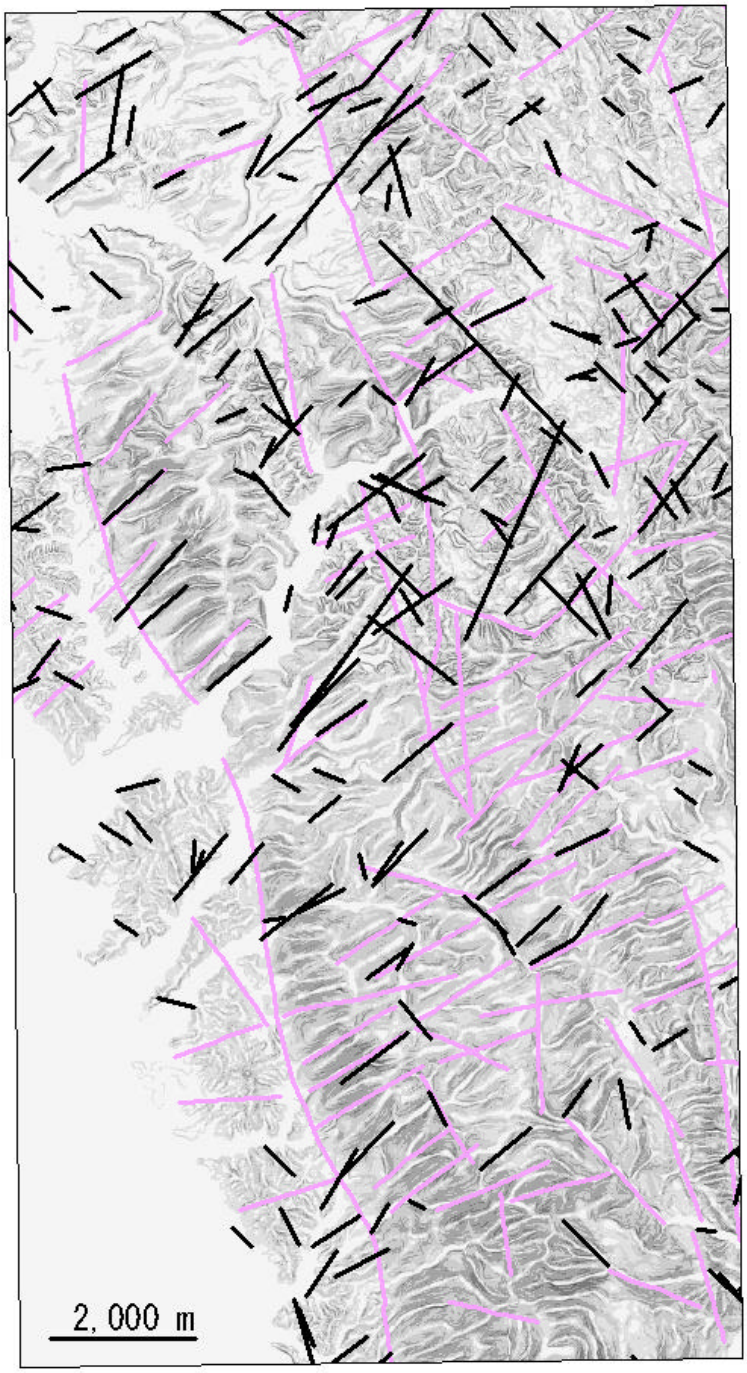


図 3.38 獲得スコアによるグループ（黒）の分布と方位特性［スコア 15 未満］
n=41



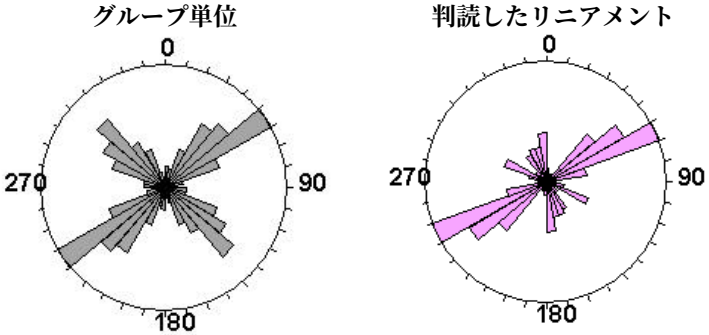
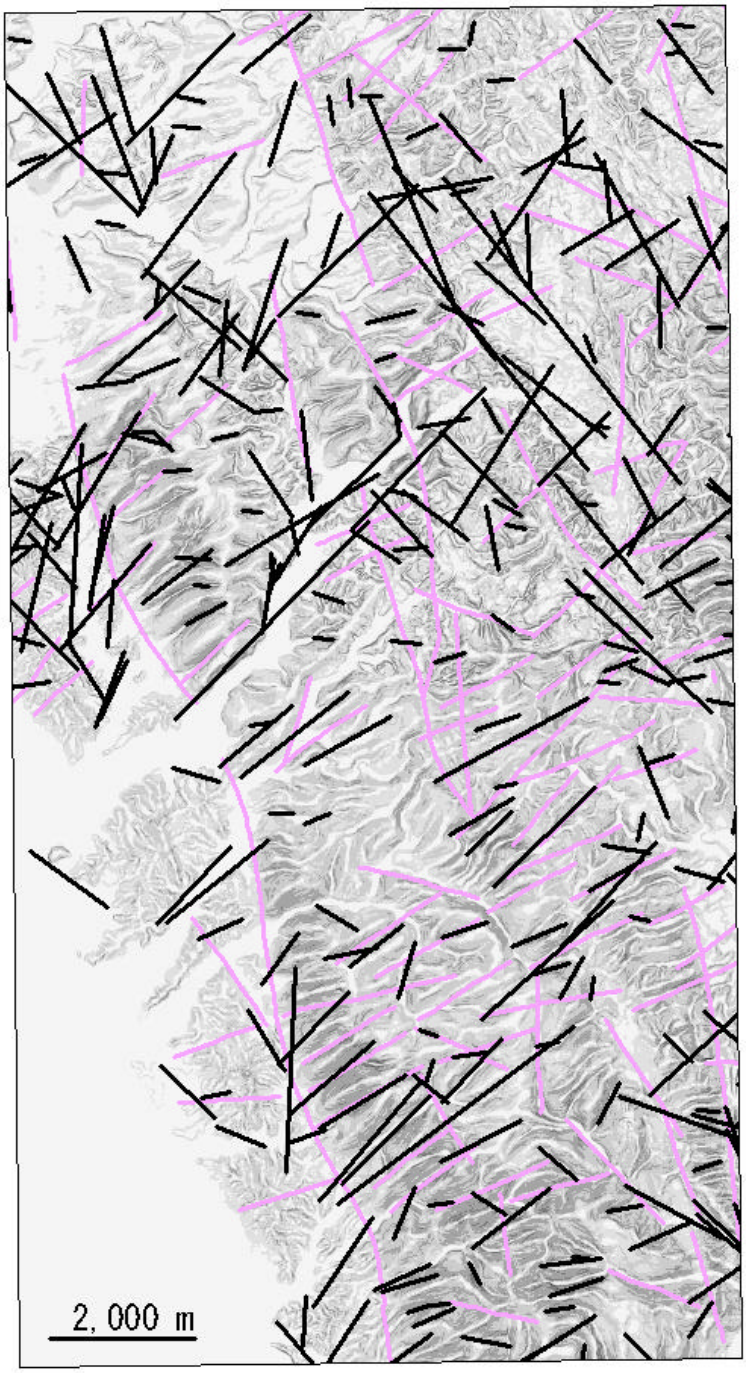


図 3.39 獲得スコアによるグループ（黒）の分布と方位特性［スコア 15 以上 18 未満］
n=264



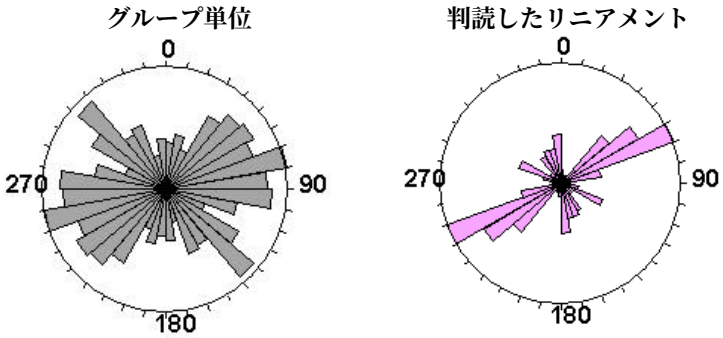


図 3.40 獲得スコアによるグループ（黒）の分布と方位特性［スコア 18 以上 21 未満］
n=326

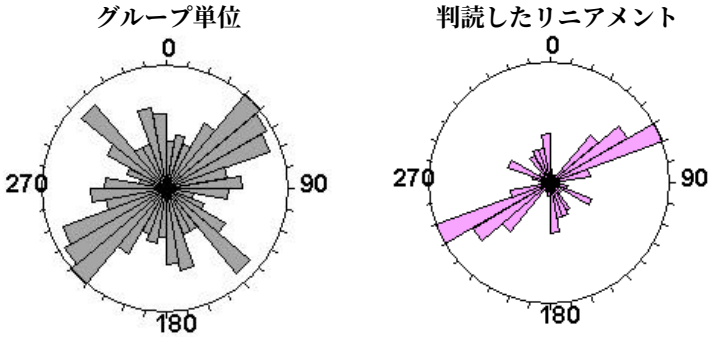
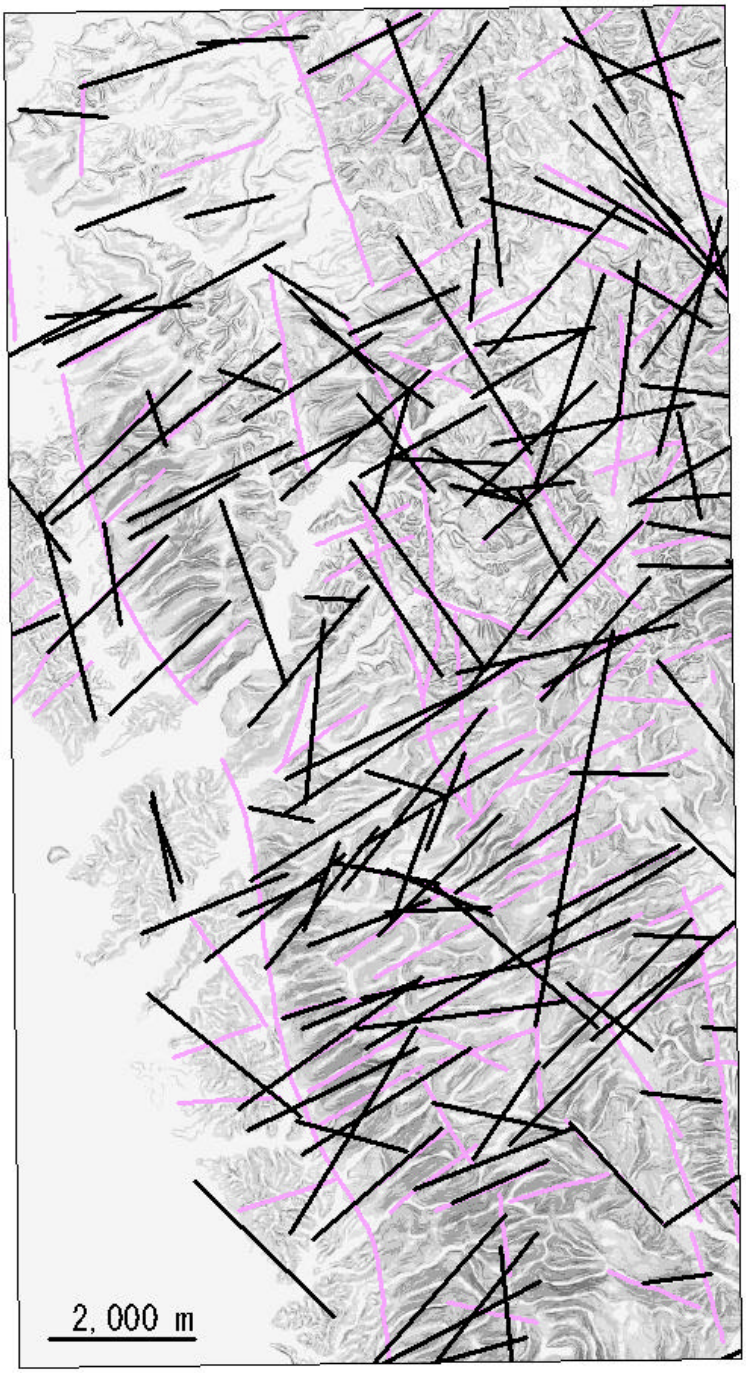


図 3.41 獲得スコアによるグループ（黒）の分布と方位特性［スコア 21 以上 23 未満］
n=186



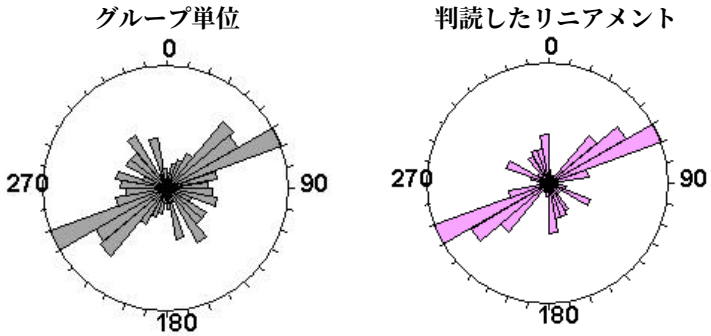
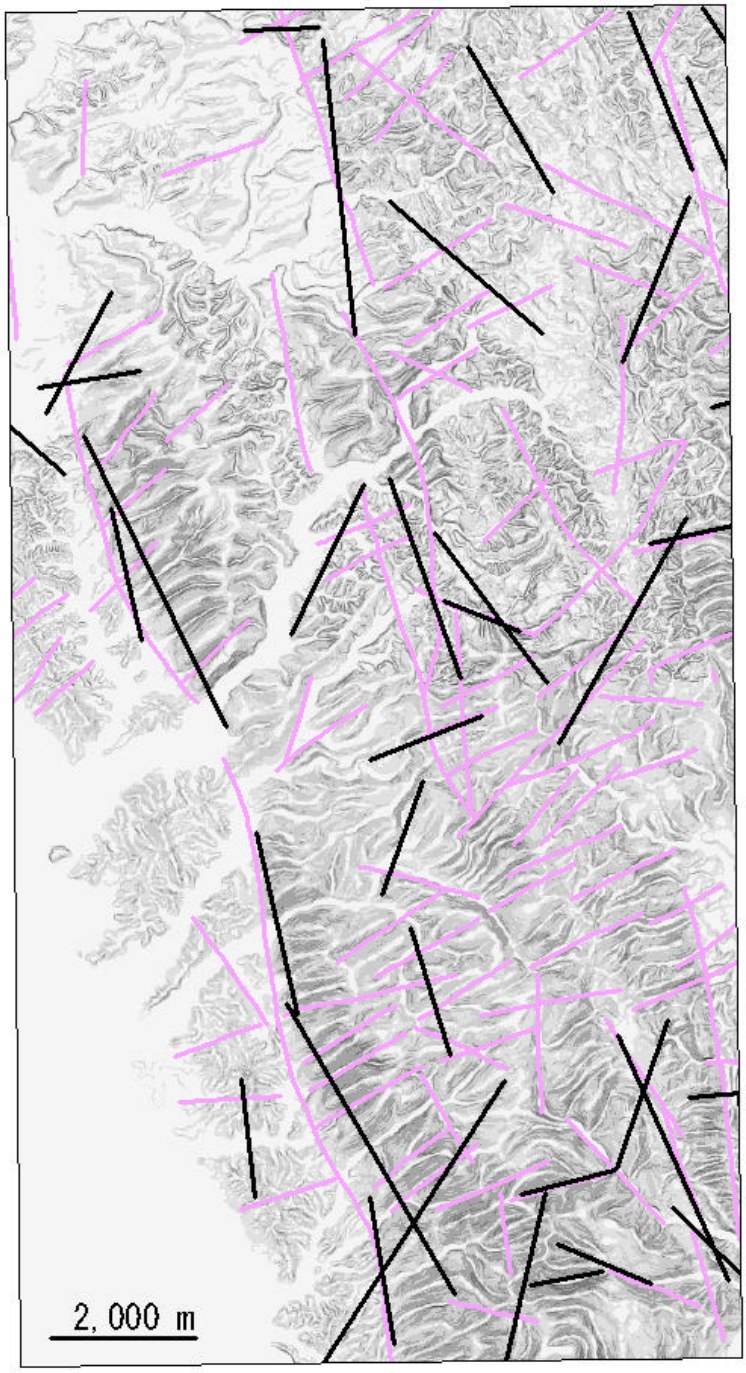


図 3.42 獲得スコアによるグループ（黒）の分布と方位特性［スコア 23 以上 25 未満］
n=168



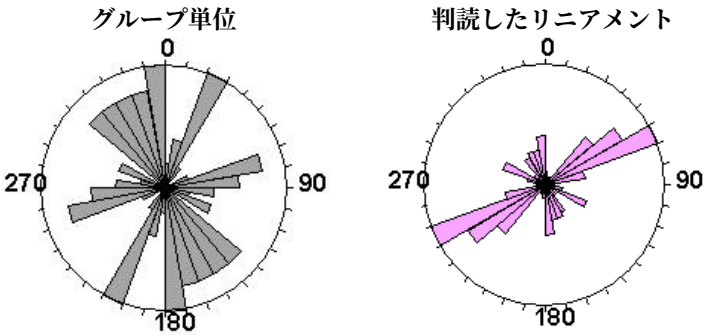
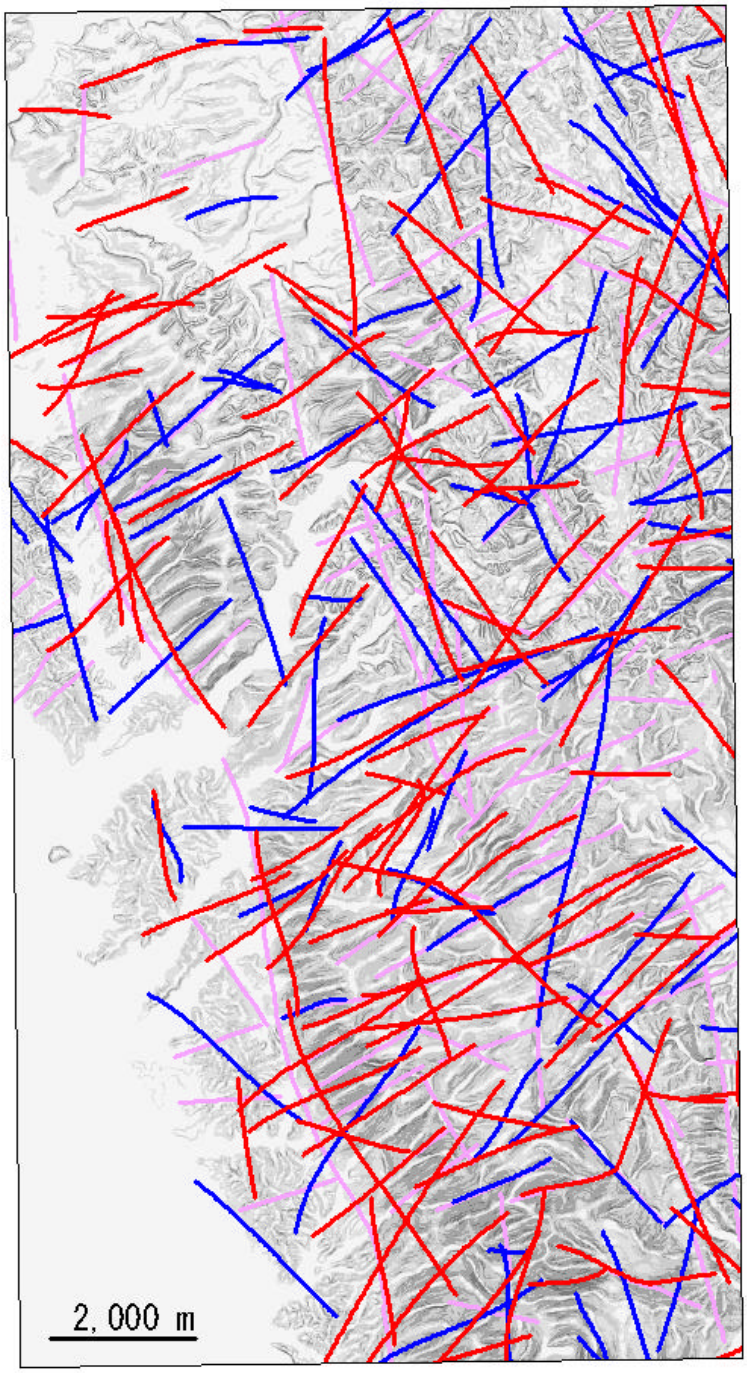


図 3.43 獲得スコアによるグループ（黒）の分布と方位特性［スコア 25 以上］
n=43



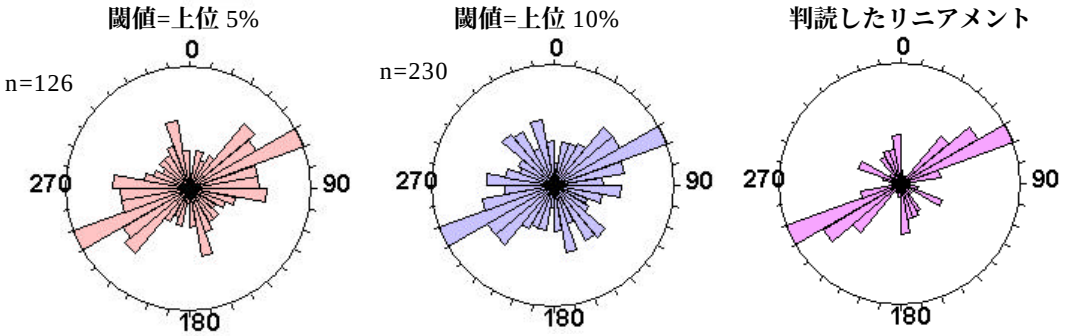


図 3.44　リニアメントを篩い分ける閾値の検討　赤 :上位 5%　青 :上位 10%］
ピンクは判読したリニアメント

3.10　線素の連結パラメータの検討

前項では，項目間のスコアリング重みと閾値を決定した。ここでは，線素連結時の探索距離やふらつき許容幅をそれぞれ 3 通りに変化させ，合計 9 ケースについて検討を実施した。

ふらつき許容幅とは，線素連結時に利用する図 2.15 に示した STA を補足するパラメータである。STA による探索領域は細長い扇形領域を利用しており，頂角は 25°と小さい。したがって，比較元の終点と比較先の始点とが接近している場合には，ほぼ連続すると判断できる線素同士であっても，図 3.45(a)のように始点が扇形領域内からはみ出るため連結されないケースがあり得る。また，図 3.45(b)連結元の終点が，連結先の始点よりも右側にある場合も連結されないケースがでてしまう。さらに，傾斜変換線から構成されるグループを後から加えており，これと接近して平行する線素が存在する場合には，これをグループに加える必要がある(図 3.45(c))。

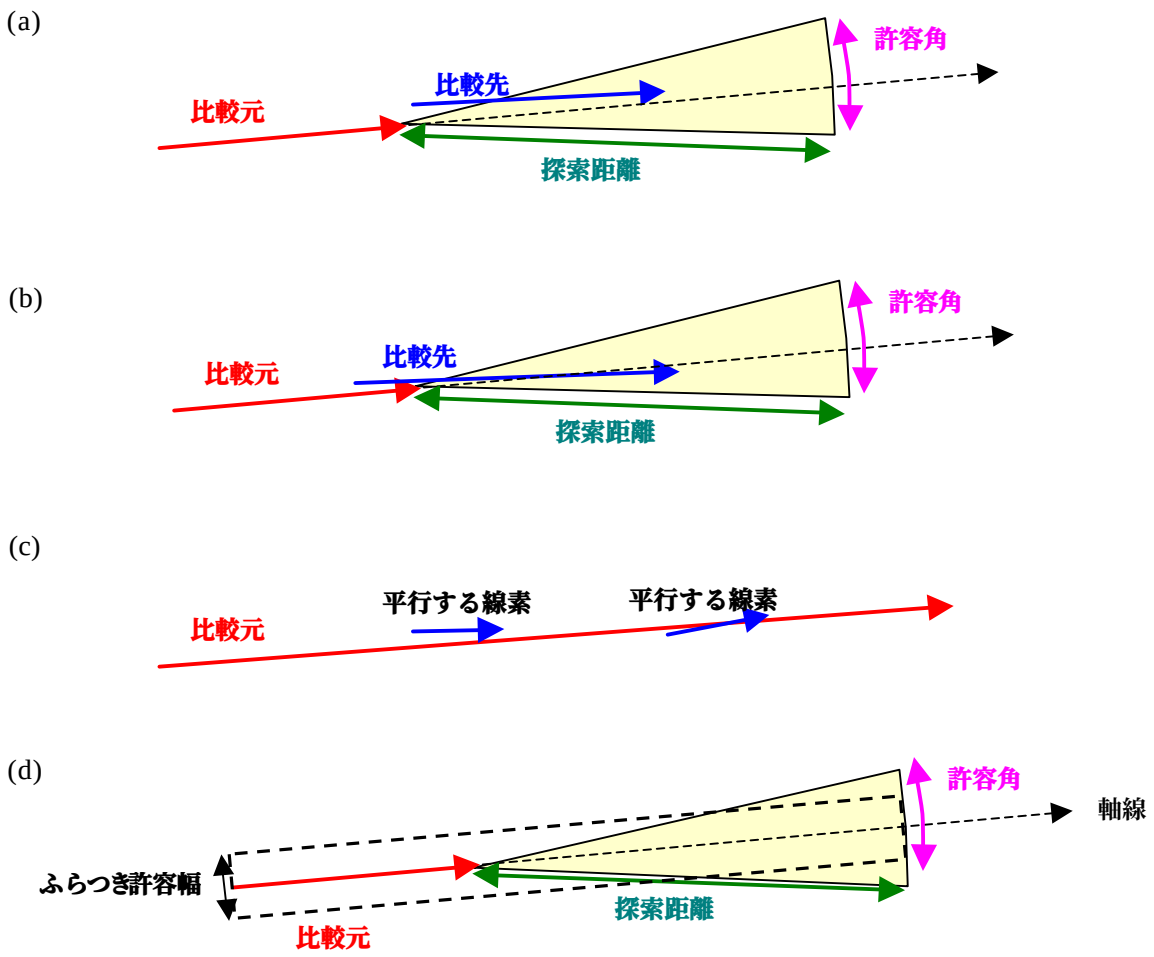


図 3.45 線素連結・追加時に設定したふらつき許容幅

図 3.45(a)～(c)のようなケースでも線素を連結，あるいは追加させるためには，比較元の

軸線上に(d)のようなふらつき許容幅を設定することで，解決することができる。この時の条件としては，始点・終点の位置が軸線までの距離(垂線)がふらつき許容幅に収まっていること，また，比較元・比較先のベクトルの内積が扇形領域の頂角の 1/2 以内に収まっていることとした。なお，探索距離の上限は通常の検索と同じ値を利用する。

グルーピングされた傾斜変換線には，これと隣接してほぼ平行する流路情報を追加する。この場合には，追加する始点・終点，および両ベクトルの内積が前述の条件に収まっていることに加え，追加するデータが比較元の始点・終点に挟まれる区間に位置することを条件とした。

対象地域の DEM から流路を抽出し，直線区間に分割後，平坦部の流路を除外すると約 7,000 本の流路が抽出される。これらが流路によって構成される構造弱線を抽出する線素データとなる。

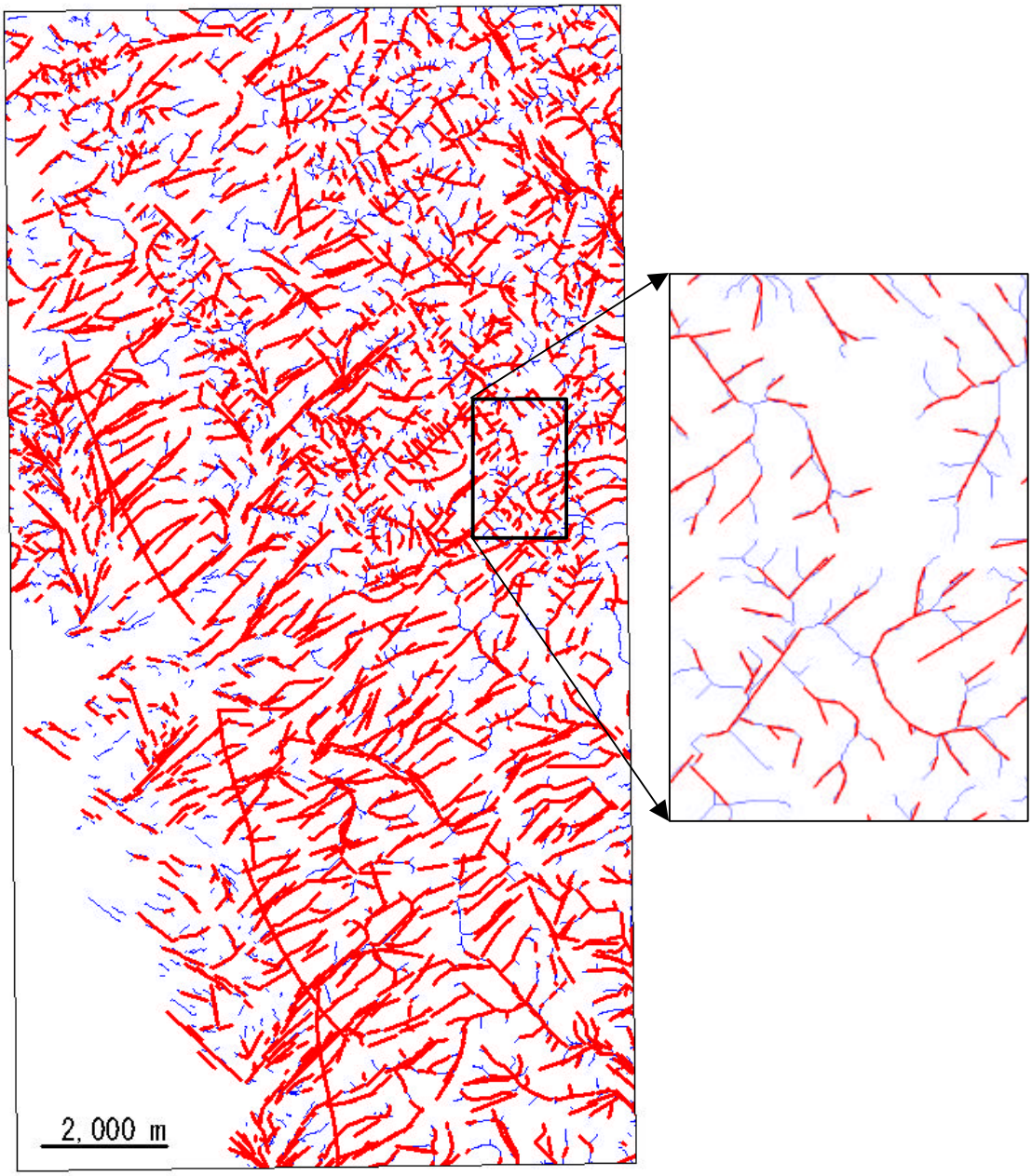
流路の連結は，1 本の流路を連結元とし，残りすべての流路に対して連結性の状態をチェックする。このときすべての組合せを考えると ${}_{7,000}C_2$ となり，1 回の検索について 2400 万回の比較が必要となる。また，連結された線素を 1 つの線素とし，これを連結元に加え，連結される線素が無くなる状態まで繰り返す。そのため膨大な計算量が必要となる。

ここでは効率的に探索を行うため，線素の左上が始点となるように始点・終点の置換を行い，座標で並べ替えを行った。こうしておけば連結元の終点座標と連結先の始点座標との距離が検索距離上限以上であれば，これ以降の組合せを検討する必要が無くなる。このようにして検索時間の短縮を図った。

線素の連結は最初に 2 線素の連結から行う。1 回目の連結が終了すると，これ以降に繰り返される連結では，グループ間の連結およびグループと線素間の結合となり，新たにグループが増加することはない。

図 3.46 は，2 線素の連結が終了した状態に，3.6 項の傾斜変換線で抽出された線素，および 3.7 項で抽出された山地/平野直線境界を加えたものである。図 3.46 のうち青色が線素連結に用いた流路情報であり，赤が連結された線素と傾斜変換線及び山地/平野直線境界を表している。

図 3.46 には線素連結に利用される流路と連結された線素のローズダイアグラムを示した。両者はほぼ同じ特徴を有しており，NE-SW および NW-SE 方向が卓越する。このうち NE-SW 方向は図 3.47 で示すように主流路に相当し，NW-SE 方向はこれに流入する支流が多くなっている。なお，大曲断層の東側では NE-SW 方向の主流路のみが発達し，これと直交する NW-SE 方向の流路は発達しない。これに対し地域の中～北部では，NW-SE 方向の流路が比較的多く，特に声問層上部，増幌層および宗谷夾炭層に発達している。



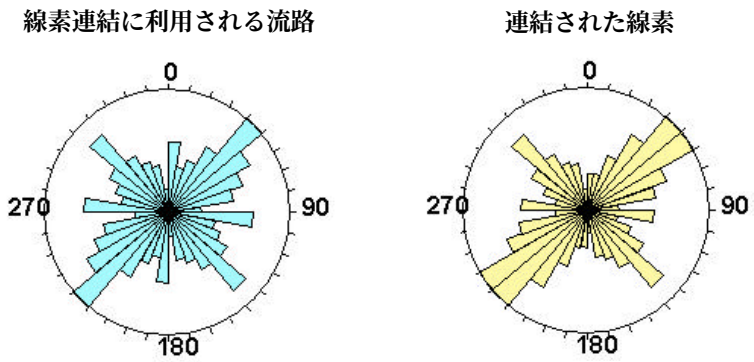


図 3.46 線素連結初期段階 赤 連結された線素 青 線素連結に利用される流路

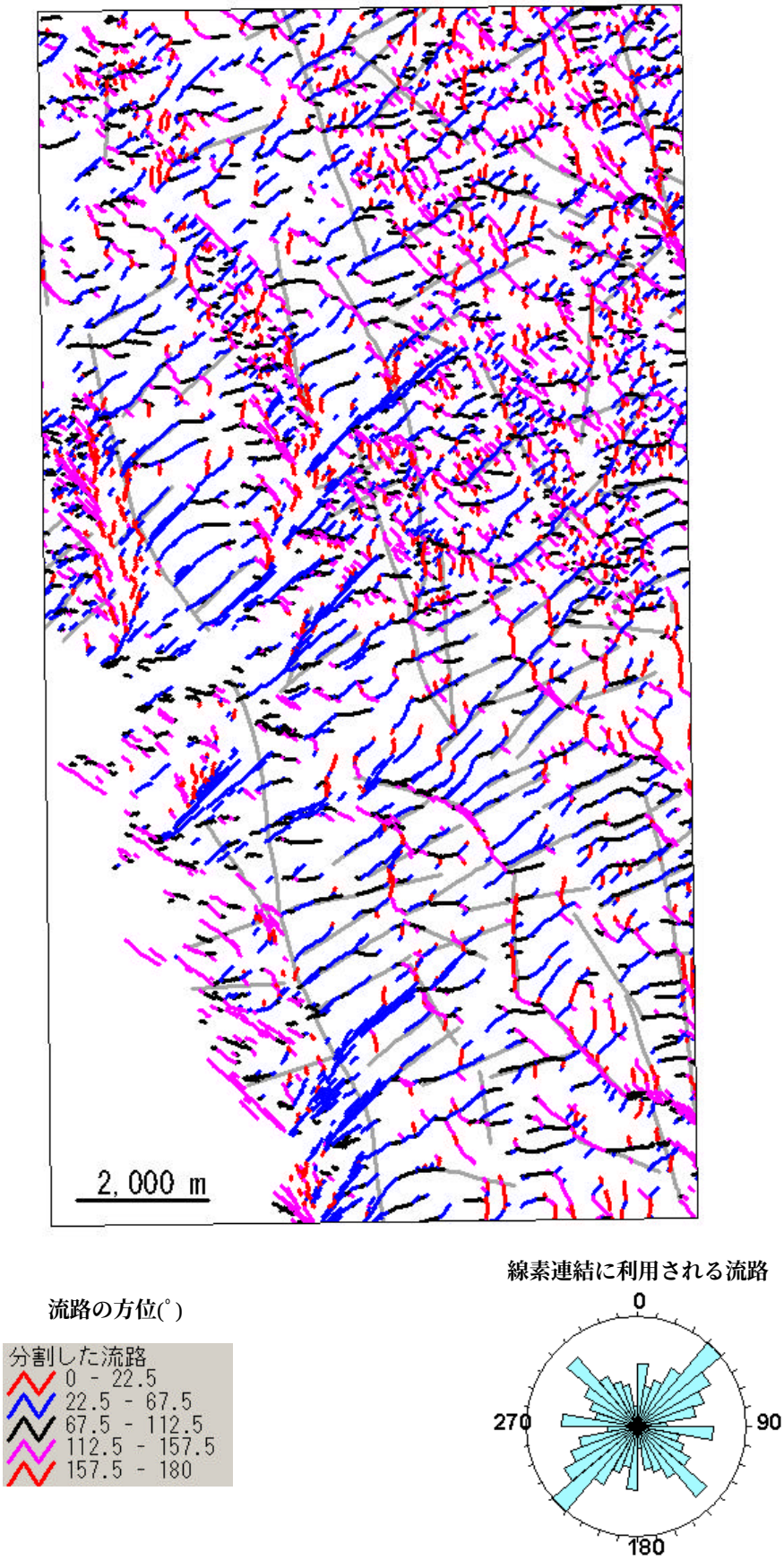


図 3.47　分割された流路の方位特性　灰色は判読されたリニアメント

判読されるリニアメントでは，直線的な流路によっ識別されるリニアメントが一般に多い。本手法によるリニアメント抽出でも，流路の直線性から抽出されるグループが最も多く，流路情報の処理は重要な部分を担っている。

流路からなる線素結合には①検索距離上限，②比較元線素の軸線からの距離(ふらつき許容幅)が検討すべきパラメータとしてある。ここでは，
表 3.5 の 3×3 通り=9 ケースについて検討した。

表 3.5 線素連結パラメータの組合せ

ケース	検索距離上限	ふらつき許容幅（片側）	連結された線素
A3	30 (300m)	3 (30m)	5,347
A6		6 (60m)	5,692
A9		9 (90m)	5,742
B3	60 (600m)	3 (30m)	5,570
B6		6 (60m)	5,903
B9		9 (90m)	5,944
C3	90 (900m)	3 (30m)	5,631
C6		6 (60m)	5,933
C9		9 (90m)	5,955

表 3.5 は，パラメータを変更し，線素間の連結を行った初期状態の連結結果である。検索距離やふらつき幅を大きくすると，連結される線素が増加していることが解る。次に連結された線素からなるグループ同士，あるいはグループと線素の連結を繰り返し，連結を終了した時点での結果を表 3.6 および図 3.48 に示した。

図 3.48 上は連結終了時点での，グループ数(左)とグループ平均長(右)の変化を示したグラフである。検索上限距離を 300,600,900m と変更しても，ふらつき許容幅を 3 メッシュとした場合には，グループ数ははぼ一定である。ふらつき許容幅を 3→6→9 と広げると，グループ数は統合によって減少する。このとき検索距離上限が大きいほどグループは統合されやすくなるが，グループ数は極端に減少することはない。

右上は統合されたグループの平均長の変化を表す。グループ平均長はパラメータによって大きく変化し，連結距離上限を固定し，ふらつき許容幅を 90m とすると 30m の場合に較べ 2 倍以上長く連結される。ふらつき許容幅を固定した場合も検索距離上限を大きくするに従ってグループ平均長は長くなり，検索距離上限 300m とした場合に較べ 900m では約 1.5～2 倍のグループ平均長となる。したがって，連結条件を最も厳しくしたケース(A3)と緩くしたケース(C9)とはグループ平均長は 3 倍以上も変化している。

抽出されたグループを，前項で述べた項目の重みでスコアリングすると，図 3.48 の様にリニアメント数，リニアメント長は変化する。リニアメントを篩い分ける閾値は上位 5%ととしており，リニアメント数の変化には大きな意味はない。リニアメント長の変化は，連結されたグループとほぼ同様の変化を示し，連結距離上限を 900m にするとリニアメント長は 1.5～2 倍長くなる。また，ふらつき許容幅についても 90m にすると 1.5～2 倍長くな

る。したがって，連結条件を最も厳しくしたケース(A3)と緩くしたケース(C9)とはリニアメント平均長は 3 倍程度変化する。なお，統合されたグリニアメントの平均長は 2,100m となっている。

以上の様に，連結パラメータは連結・統合されたグループ，および篩い分けられたリニアメントの長さに影響していることが明らかとなった。

図 3.49～57 は，最終的に統合されたグループを構成する線素と，閾値によって篩い分けられたリニアメントを構成する線素を示したものである。また，これら 2 者と判読されたリニアメントとの方位特性をローズダイアグラムで表した。

表 3.6 線素連結パラメータの組合せ

	連結パラメータ		連結終了時点		スコアリング［上位５%］		
ケース	検索距離上限	ふらつき許容幅	抽出グループ数	グループ平均長(m)	抽出リニアメント数	抽出率(%)	リニアメント平均長(m)
A3	３０ (300m)	3 (30m)	1,912	445	134	7.0	1,180
A6		6 (60m)	1,768	587	144	8.1	1,583
A9		9 (90m)	1,628	698	140	8.6	1,849
B3	６０ (600m)	3 (30m)	1,919	580	132	6.9	1,508
B6		6 (60m)	1,697	868	126	7.4	2,260
B9		9 (90m)	1,442	1,114	116	8.0	2,781
C3	９０ (900m)	3 (30m)	1,902	702	129	6.8	1,703
C6		6 (60m)	1,612	1,122	119	7.4	2,659
C9		9 (90m)	1,360	1,498	104	7.6	3,502
平均			1,693	846	127	7.5	2,114

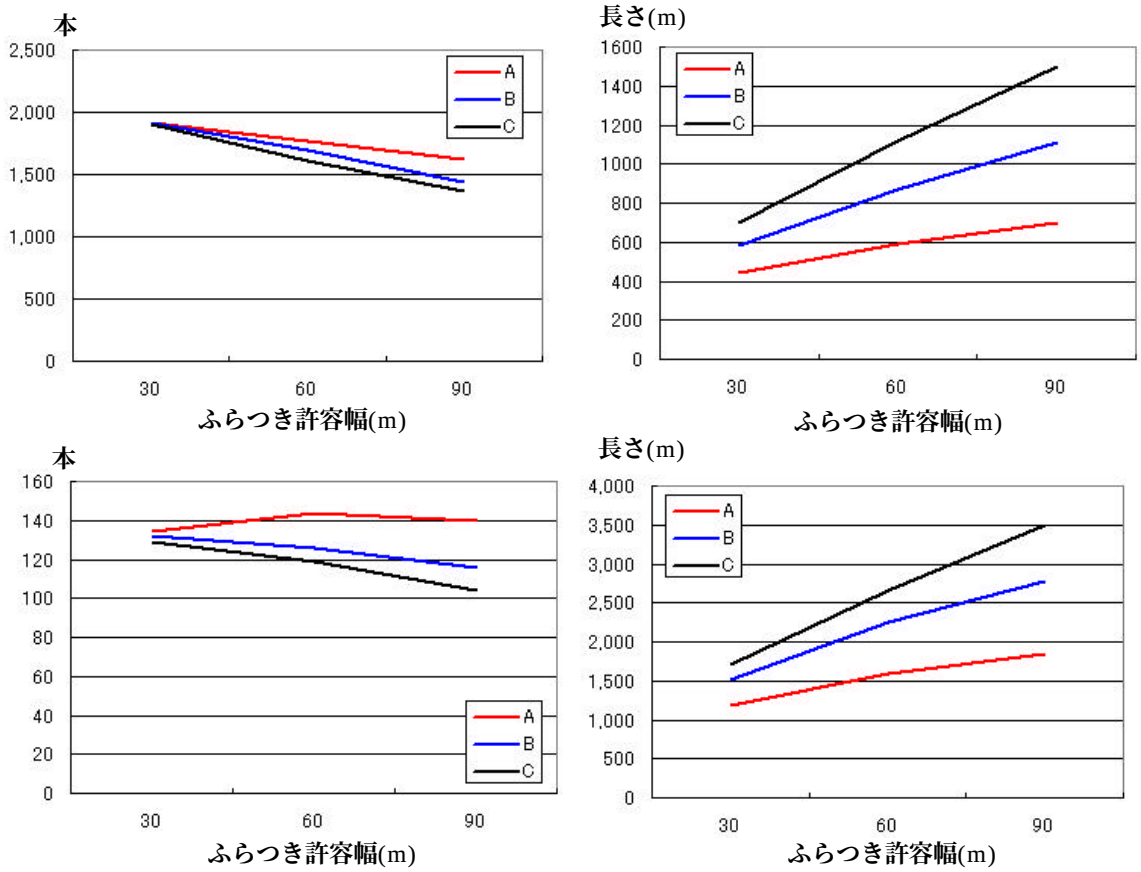


図 3.48 連結パラメータを変更したリニアメント連結・抽出結果
横軸はふらつき許容幅(m), 検索上限距離を色で分類 A(赤)=300, B(青)=600, C(黒)=900m
左上 :連結終了時のグループ数の変化 縦軸 :本
右上 :連結終了時のグループ平均長の変化 縦軸 :m
左下 :リニアメント抽出(5%)後のリニアメント数の変化 縦軸 :本
右下 :リニアメント抽出(5%)後のリニアメント平均長の変化 縦軸 :m

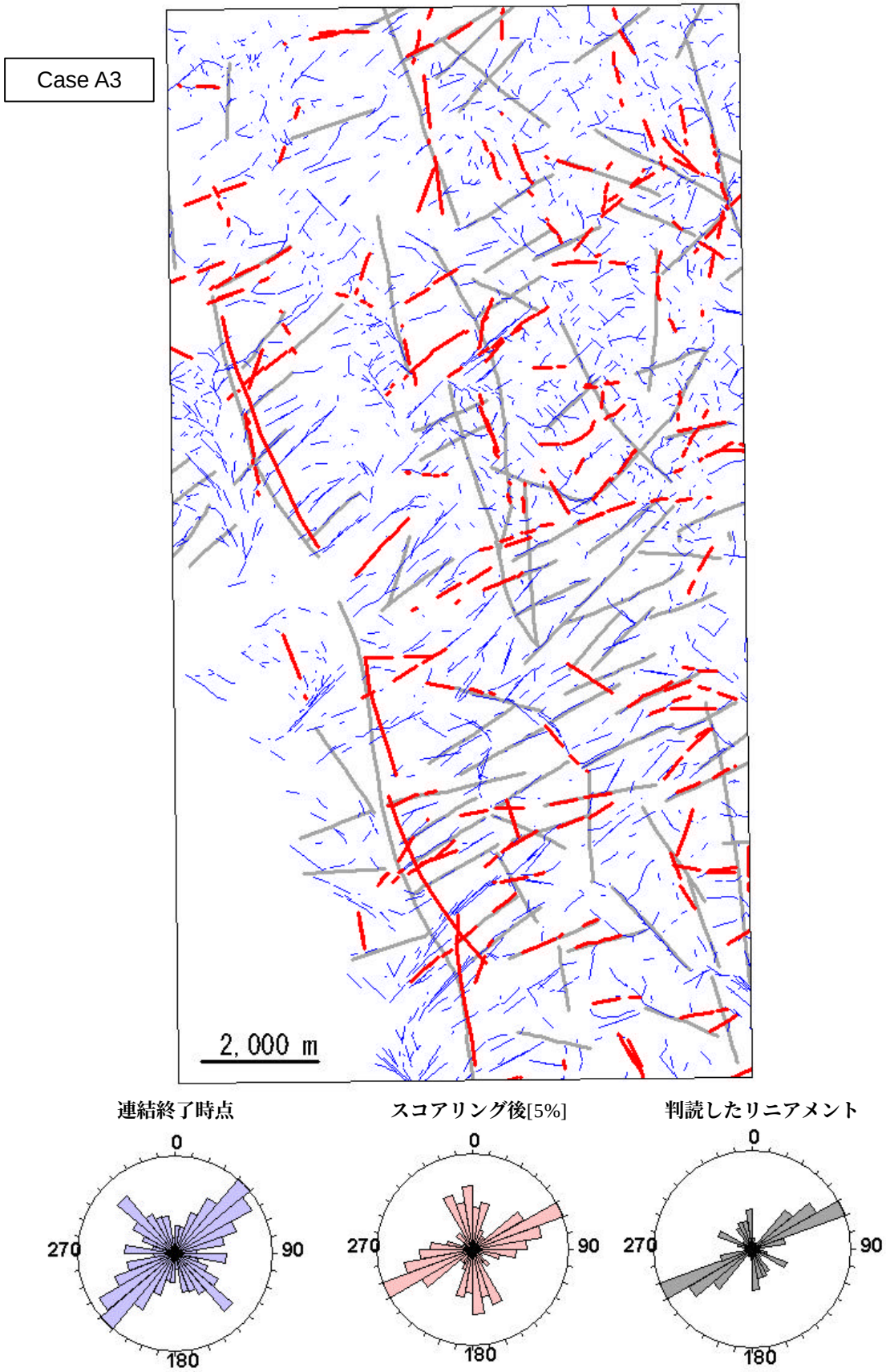


図 3.49 連結パラメータ［Case_A3］のリニアメント抽出結果
青 :連結終了時点 赤 :スコアリング後［5%］ 灰 :リニアメント判読結果
連結距離上限＝30 メッシュ ふらつき許容幅=3 メッシュ

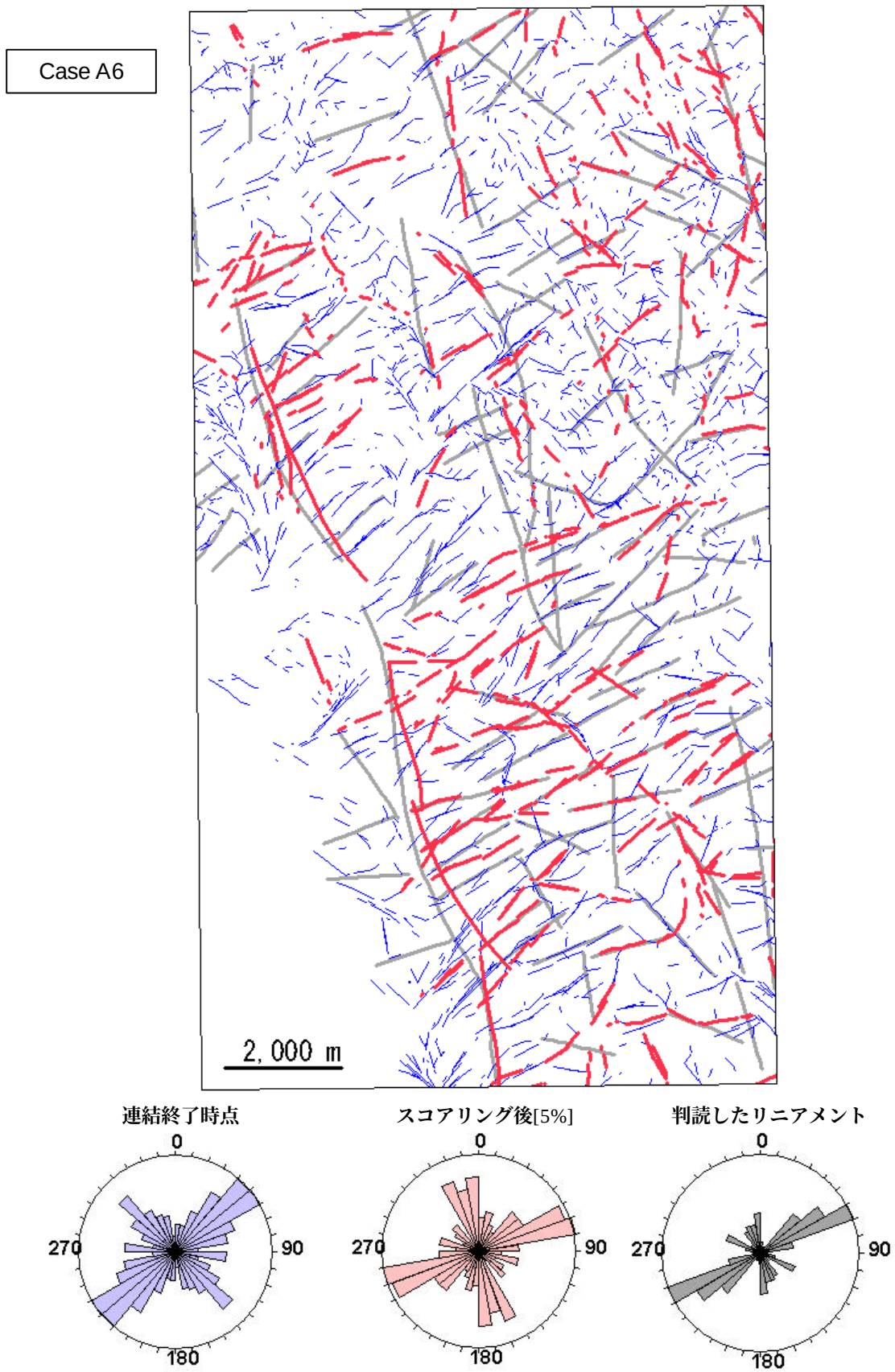
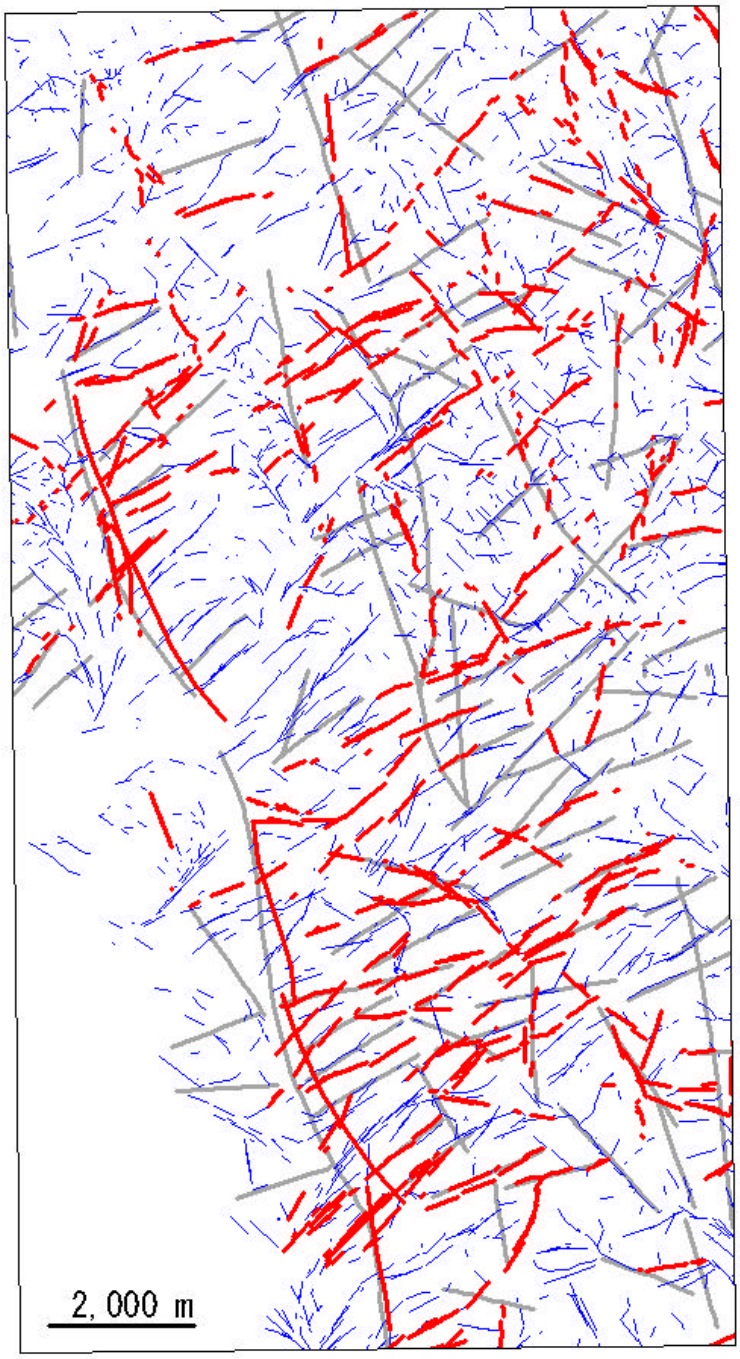


図 3.50 連結パラメータ［Case_A6］のリニアメント抽出結果
青 :連結終了時点 赤 :スコアリング後［5%］ 灰 :リニアメント判読結果
連結距離上限＝30 メッシュ ふらつき許容幅=6 メッシュ

Case A9



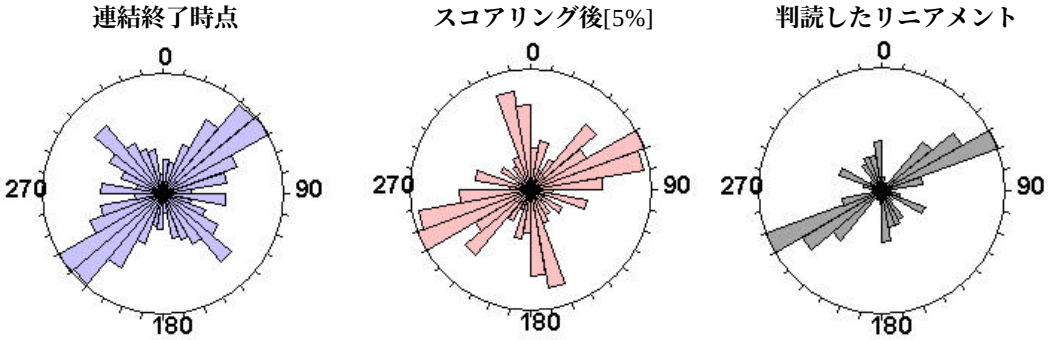


図 3.51 連結パラメータ［Case_A9］のリニアメント抽出結果
青 :連結終了時点 赤 :スコアリング後［5%］ 灰 :リニアメント判読結果
連結距離上限＝30 メッシュ ふらつき許容幅=9 メッシュ

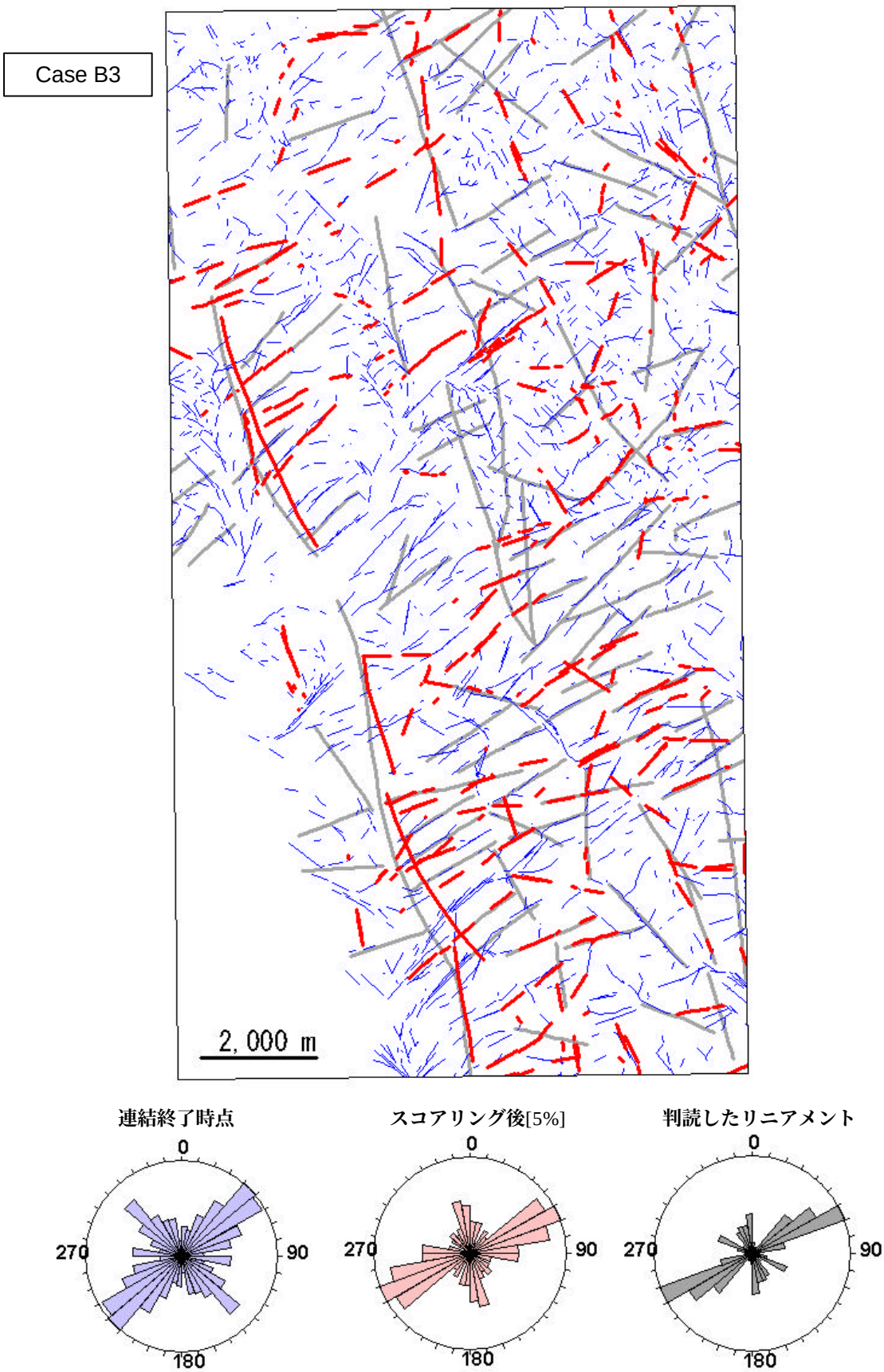
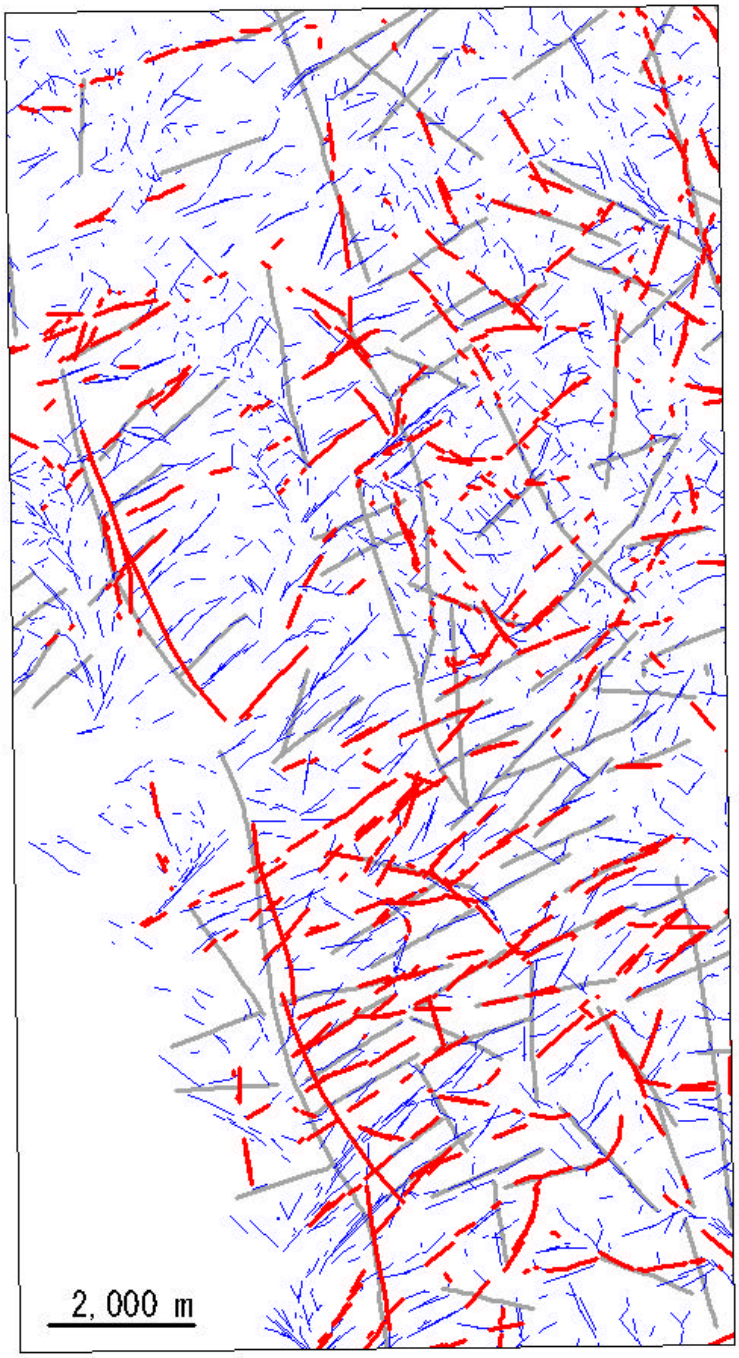


図 3.52 連結パラメータ［Case_B3］のリニアメント抽出結果
青 :連結終了時点 赤 :スコアリング後［5%］ 灰 :リニアメント判読結果
連結距離上限＝60 メッシュ ふらつき許容幅=3 メッシュ

Case B6



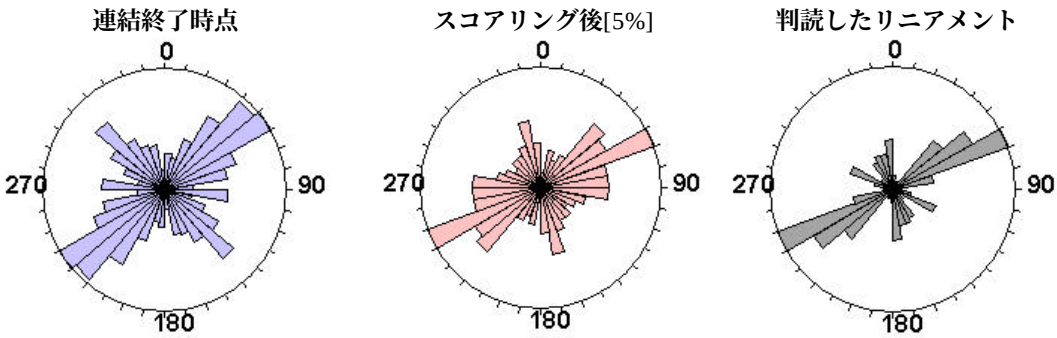


図 3.53 連結パラメータ［Case_B6］のリニアメント抽出結果
青 :連結終了時点 赤 :スコアリング後［5%］ 灰 :リニアメント判読結果
連結距離上限＝60 メッシュ ふらつき許容幅=6 メッシュ

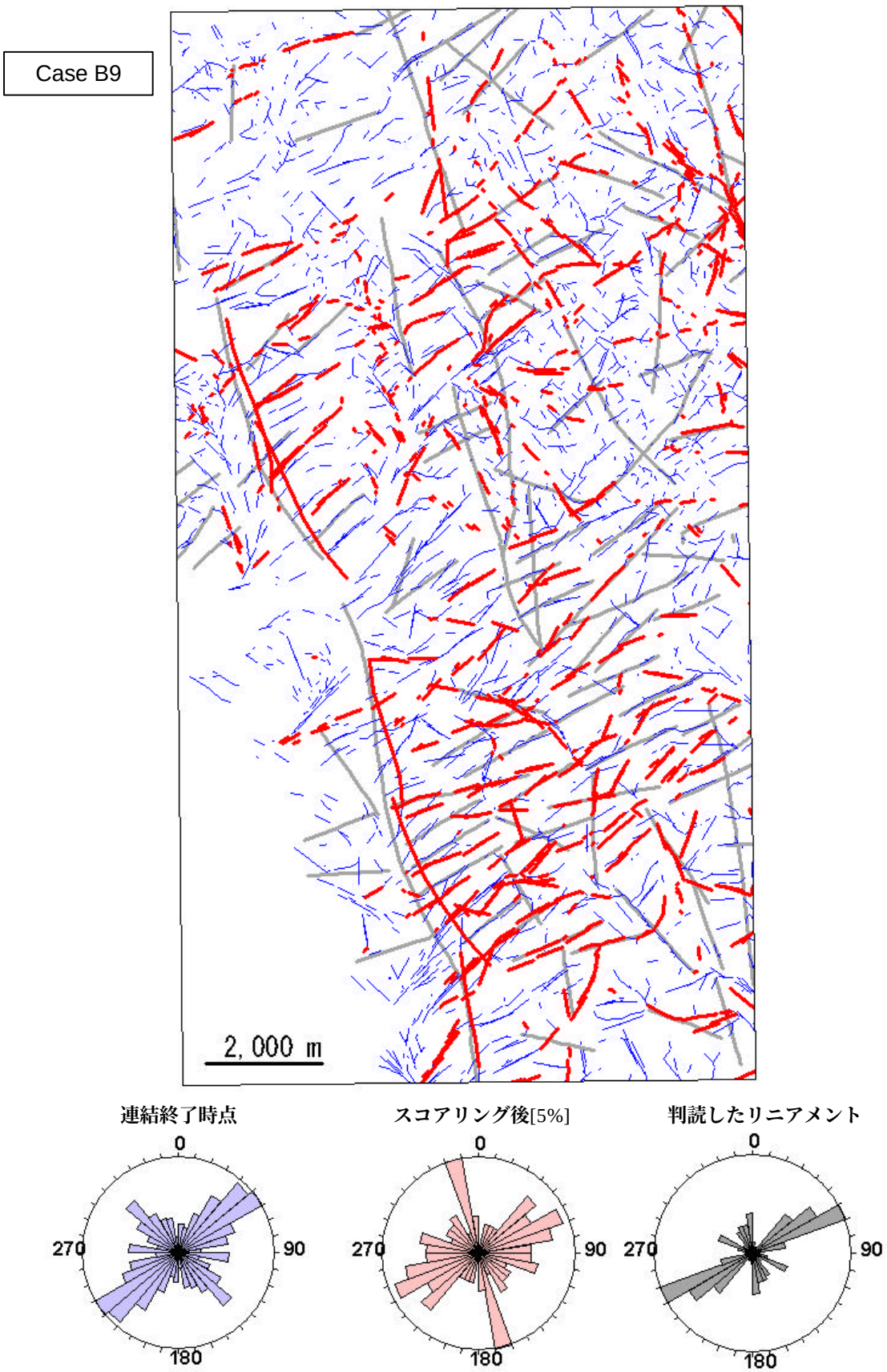


図 3.54 連結パラメータ［Case_B9］のリニアメント抽出結果
青：連結終了時点 赤：スコアリング後［5%］ 灰：リニアメント判読結果
連結距離上限＝60 メッシュ ふらつき許容幅=9 メッシュ

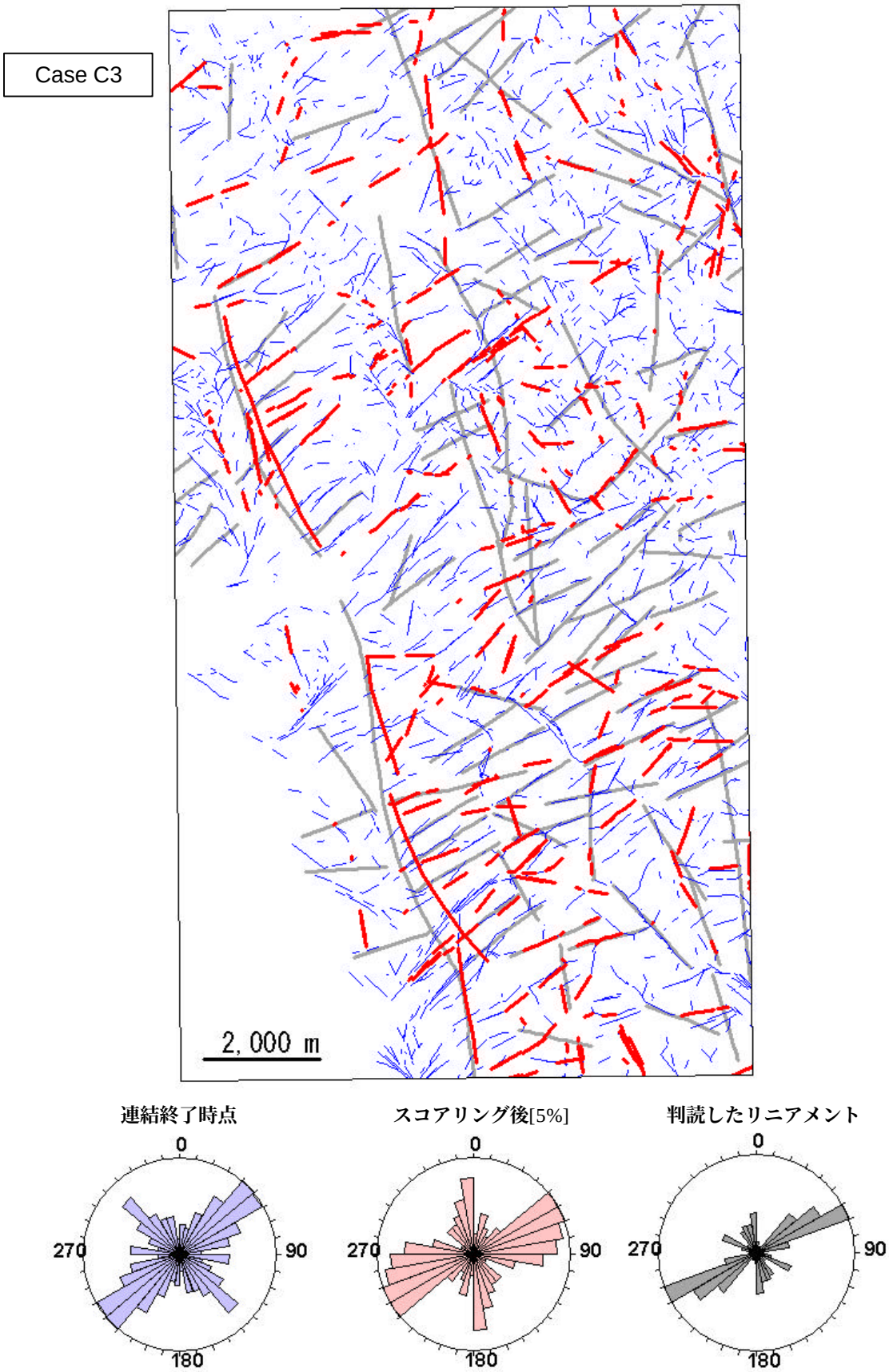
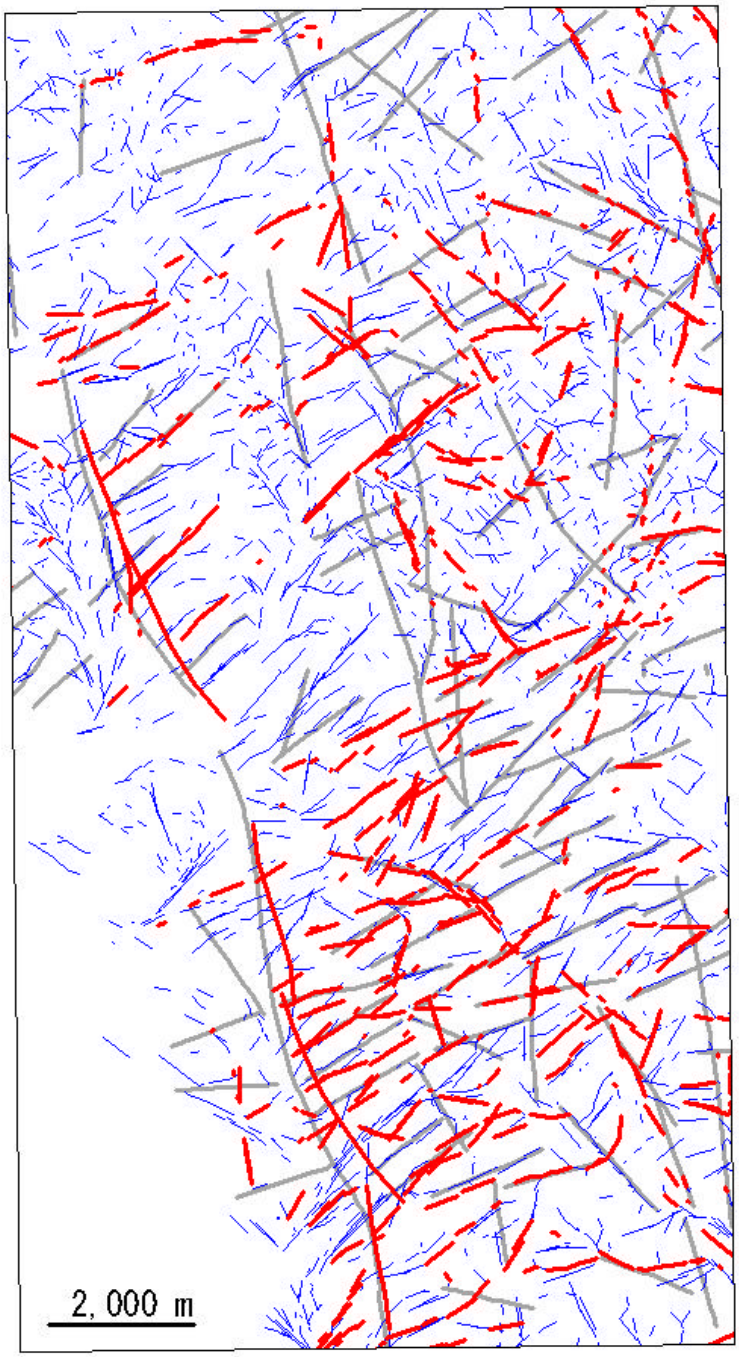


図 3.55 連結パラメータ［Case_C3］のリニアメント抽出結果
青 :連結終了時点 赤 :スコアリング後［5%］ 灰 :リニアメント判読結果
連結距離上限＝90 メッシュ ふらつき許容幅=3 メッシュ

Case C6



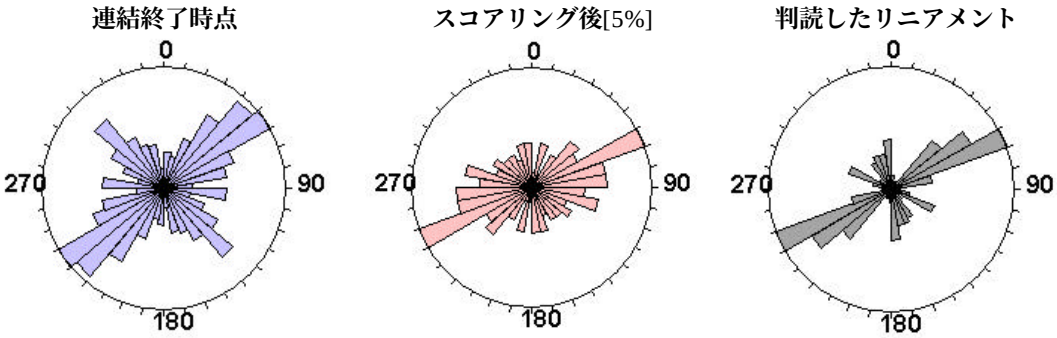
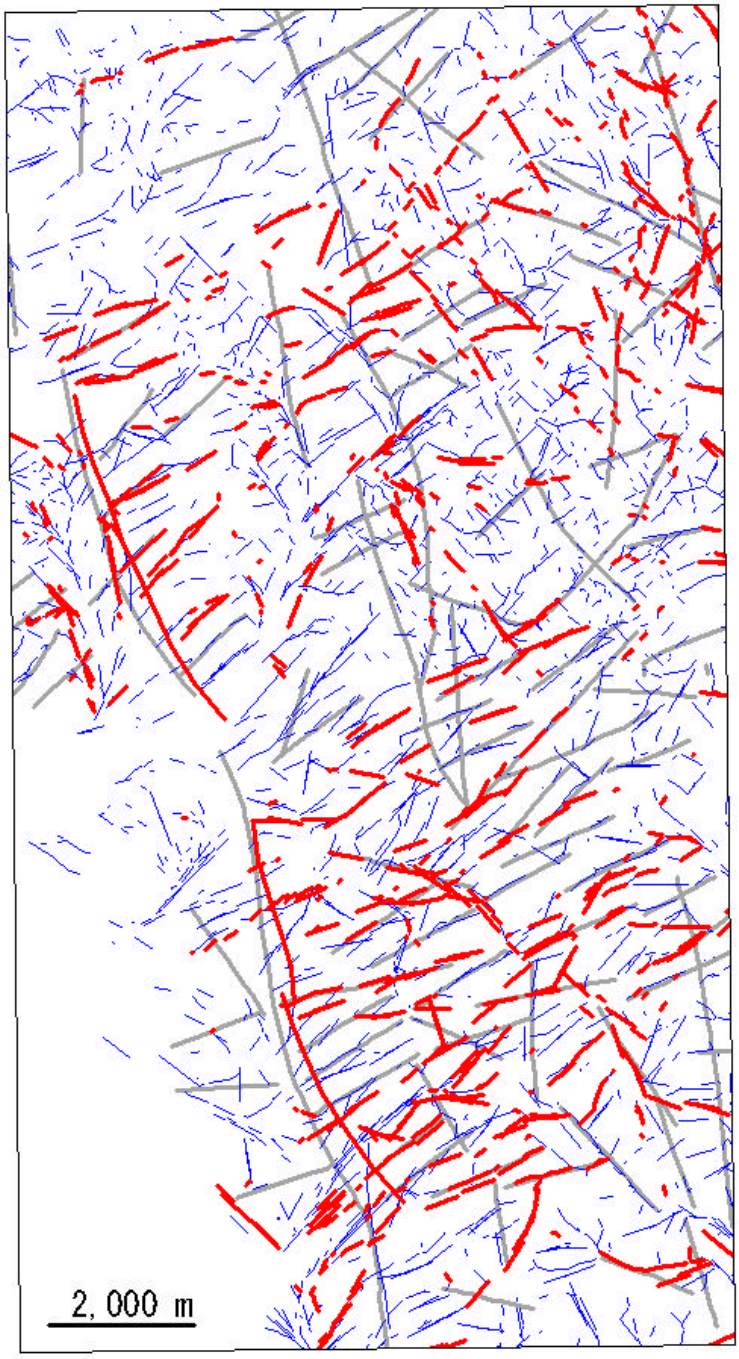


図 3.56 連結パラメータ［Case_C6］のリニアメント抽出結果
青 :連結終了時点 赤 :スコアリング後［5%］ 灰 :リニアメント判読結果
連結距離上限＝90 メッシュ ふらつき許容幅=6 メッシュ

Case C9



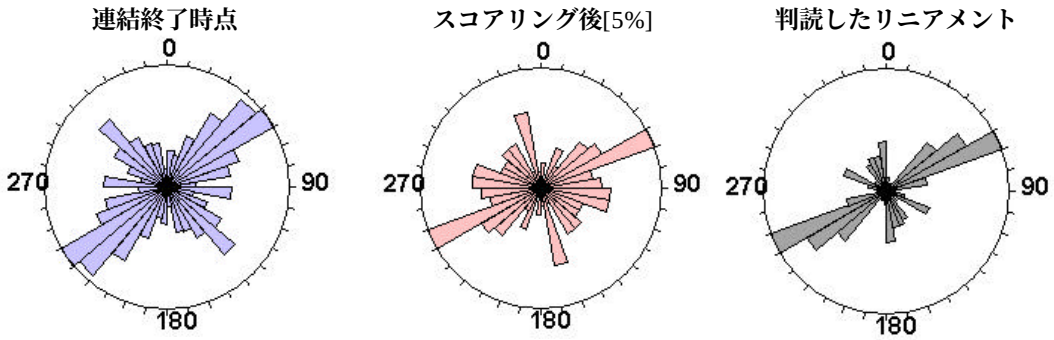


図 3.57 連結パラメータ［Case_C9］のリニアメント抽出結果
青 :連結終了時点 赤 :スコアリング後［5%］ 灰 :リニアメント判読結果
連結距離上限＝90 メッシュ ふらつき許容幅=9 メッシュ

連結パラメータを変更した図 3.49～3.57 では，連結・統合されたグループの方位特性はほぼ変化していない。これは，同一方向のグループ同士あるいはグループ・線素で連結・統合が行われるためである。これらグループの方位特性は，大地形の傾斜方向である NE-SW 方向が最も卓越し，これと直交する方向が 2 番目に卓越することが特徴となっている。

このように抽出・連結されたグループは，連結パラメータを変化させてもその方位特性にほぼ変化はない。これに対し，スコアリング後に篩い分けられるリニアメントでは，方位特性にやや変化が認められる。

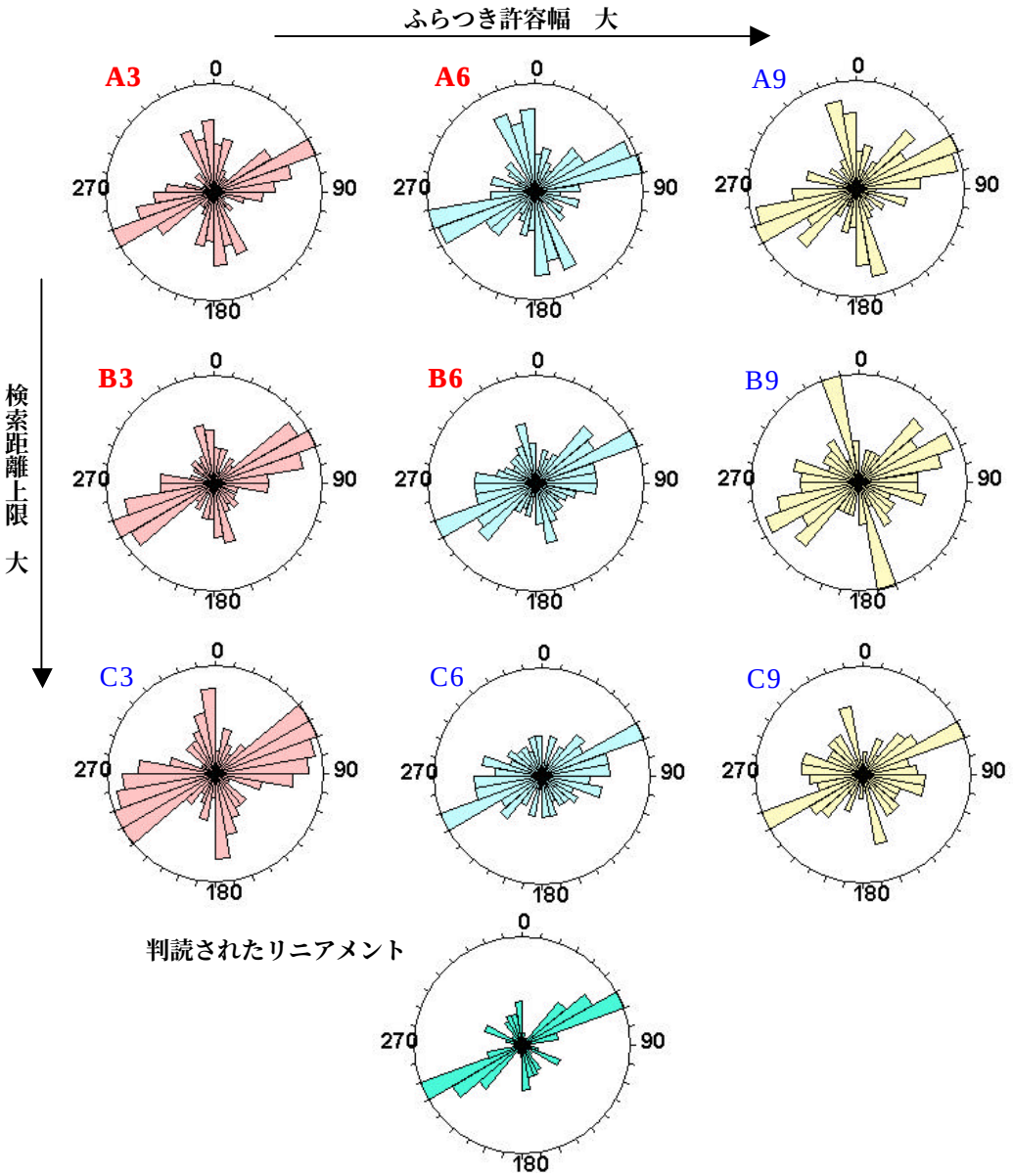


図 3.58　篩い分けられたリニアメントの方位特性[閾値=5%]
A3～C9 のパラメータは表 3.5 に従う
リニアメントとは判読されたリニアメントを示す

図 3.58 は連結パラメータを変化させ，篩い分けられたリニアメントの方位特性を表している。どのパラメータでの方位特性も，基本的には ENE-WSW 系リニアメントが卓越し，ついでこれと直交する NNW-SSE 系リニアメントが卓越することが特徴であるといえる。一般にふらつき許容幅や検索距離上限を大きくすると，N-S 方向のリニアメントが多く抽出される傾向にある。

パラメータを変化させても結果が大きく変化しない範囲は，検索距離上限が 30 と 60 およびふらつく許容幅が 3 と 6 からなる A3,A6,B3,B6 の 4 組である。これら 4 つを比較すると，検索距離上限を大きくすると ENE-WSW 系リニアメントが多くなり，相対的に N-S 系リニアメントは減少している。

したがって，検索距離上限やふらつき許容幅のパラメータをこの程度にしておけば，得られる結果にそれほど大きな変化がないと言えそうである。

3.11　線素のふらつきと標高値によるリニアメントの傾斜推定

これまでに地形特徴から線素を認識し，これら線素の連結からリニアメントを篩い分けた。これらリニアメントを構成する線素は DEM から計算されており，標高情報も利用することができる。

抽出したリニアメントを構成するこれら線素群は一直線に並ぶことは稀であり，左右に蛇行する場合が多い。このふらつきと標高との関係を調べ，標高差とともにふらつく方向が系統的に変化するのであれば，このふらつきは地表の標高変化と断裂面との交叉によってもたらされものと考えられ，断裂面の傾きが推定できる可能性がある。

ここでは，2.10 項で述べた方法により，推定したリニアメントについて傾斜を計算した。なお，傾斜の判定は，相関係数が閾値(R^2>=0.5)以上である場合とし，かつ，計算される傾斜が 45°以上の場合とした。これ以外の場合は計算不能とした。

計算されたリニアメント数は以下のとおりである。なお，前項の連結パラメータを利用してケース A3～C9 のリニアメントについて検討した。

表 3.7　リニアメント数と傾斜の計算されたリニアメント

	連結パラメータ		スコアリング［上位５%］			リニアメント傾斜の推定	
ケース	検索距離上限	ふらつき許容幅	抽出リニアメント数	抽出率(%)	リニアメント平均長(m)	計算された数	算出比率(%)
A3	３０(300m)	3　(30m)	134	7.0	1,180	25	18.7
A6		6　(60m)	144	8.1	1,583	32	22.2
A9		9　(90m)	140	8.6	1,849	27	19.3
B3	６０(600m)	3　(30m)	132	6.9	1,508	35	26.5
B6		6　(60m)	126	7.4	2,260	34	27.0
B9		9　(90m)	116	8.0	2,781	30	25.9
C3	９０(900m)	3　(30m)	129	6.8	1,703	33	25.6
C6		6　(60m)	119	7.4	2,659	32	26.9
C9		9　(90m)	104	7.6	3,502	24	23.1
A3+A6+B3+B6			512			126	24.6

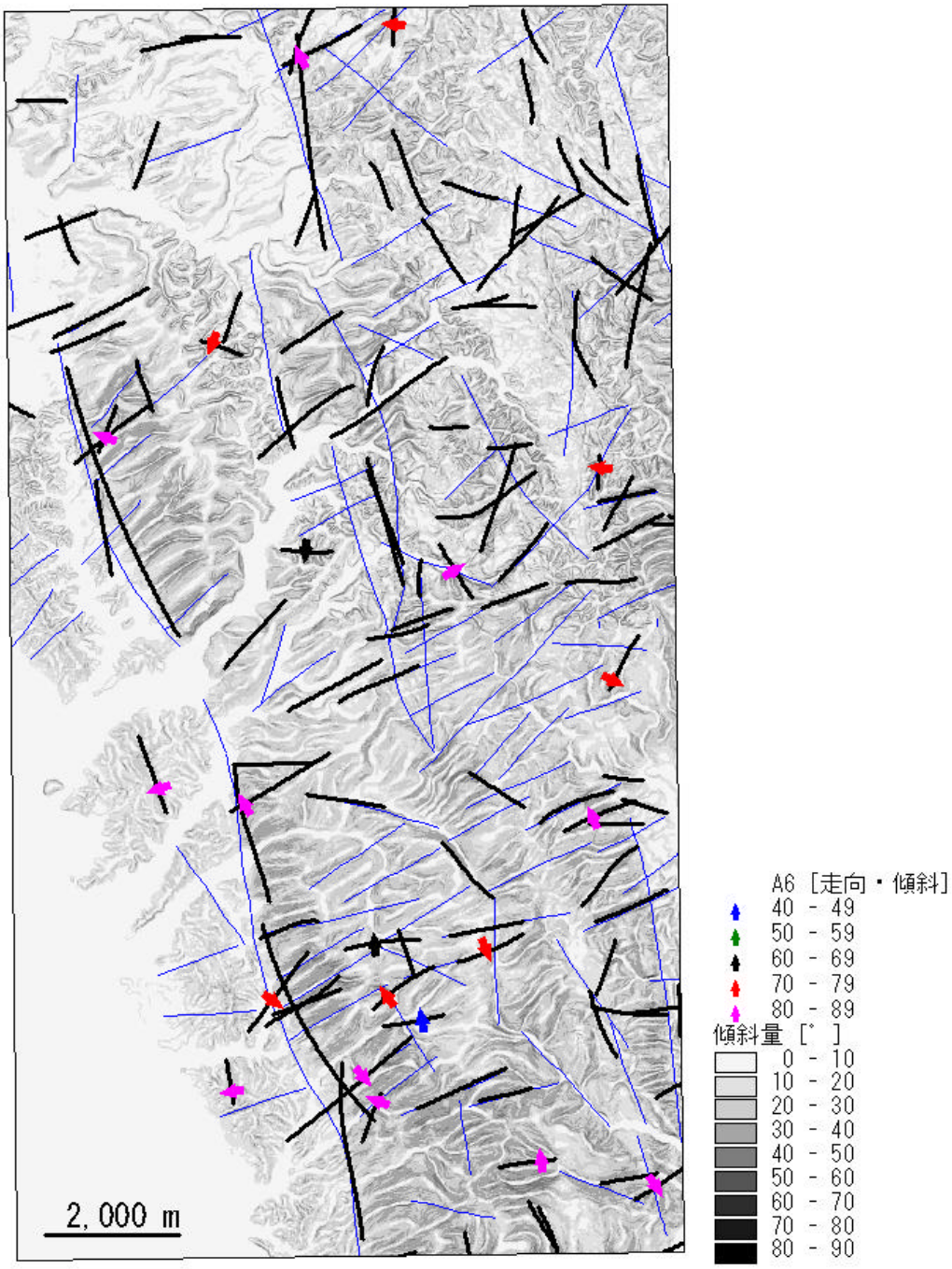
図 3.59～3.67 では，リニアメントを構成する線素を 3 次式の最小二乗法でフィッティングさせた曲線(黒実線)として表した。また線素のふらつきから推定した，リニアメントの傾斜も表示した。矢印の方向が傾斜方向を意味し，色が傾斜角を表している。図の下段の左は，リニアメントのシュミットネットを表した。なお，傾斜角が計算できなかったリニアメントについては傾斜 90°として表示した。右は傾斜が計算されたリニアメントのみから作成したシュミットネットを表示した。

図 3.59～3.67 の 3 次曲線によってフィッティングさせたリニアメントを見ると，連結距離上限を 900m としたケース C3～C9 では，連結されたリニアメント長が長すぎ，また，多数が交叉関係にあることが解る。これらは連結距離上限が長すぎるためである。

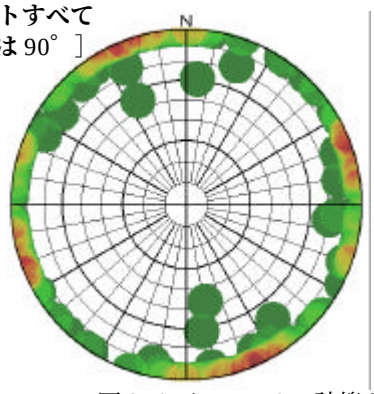
同様に A9，B6 ないし B9 でも連結されたリニアメント長は，対象領域の範囲に比較して長目である。このため，リニアメント同士が交叉する場合が多くなる。これらのケースは

連結距離上限が 300～600m であるが，ふらつき許容幅が 60～90m と大きいため連結長が長くなっている。ふらつき許容幅を小さく設定してしまうと，線素がうまく連結されない。逆に，大きく設定すると平行した線素が多数連結されてしまい，傾斜がうまく推定されないおそれがある。

ここでは，リニアメント長，ふらつき許容幅の設定値が小さい A3，A6 および B3 のリニアメント抽出結果について検討を加えた。これら 3 つのケースでは図 3.58 で示したようにリニアメントの方位特性はほぼ変化せず，判読されたリニアメントと方位特性が類似している。ただし，これら 3 つのケースでは傾斜が推定されたリニアメントが少ないことから，シュミットネットは明瞭な特徴を示していない。強いて特徴を見つけるならば，NNW-SSE 系のリニアメントは東傾斜を持つもののがやや多くなることが特徴といえる。



リニアメントすべて
［計算不可は 90°］



傾斜が計算された
リニアメントのみ

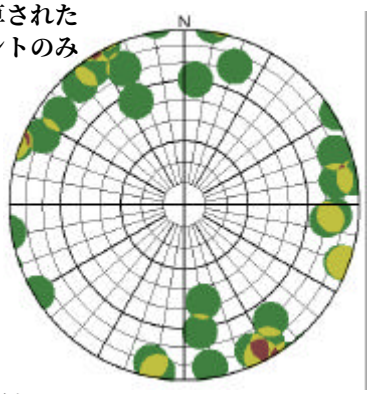
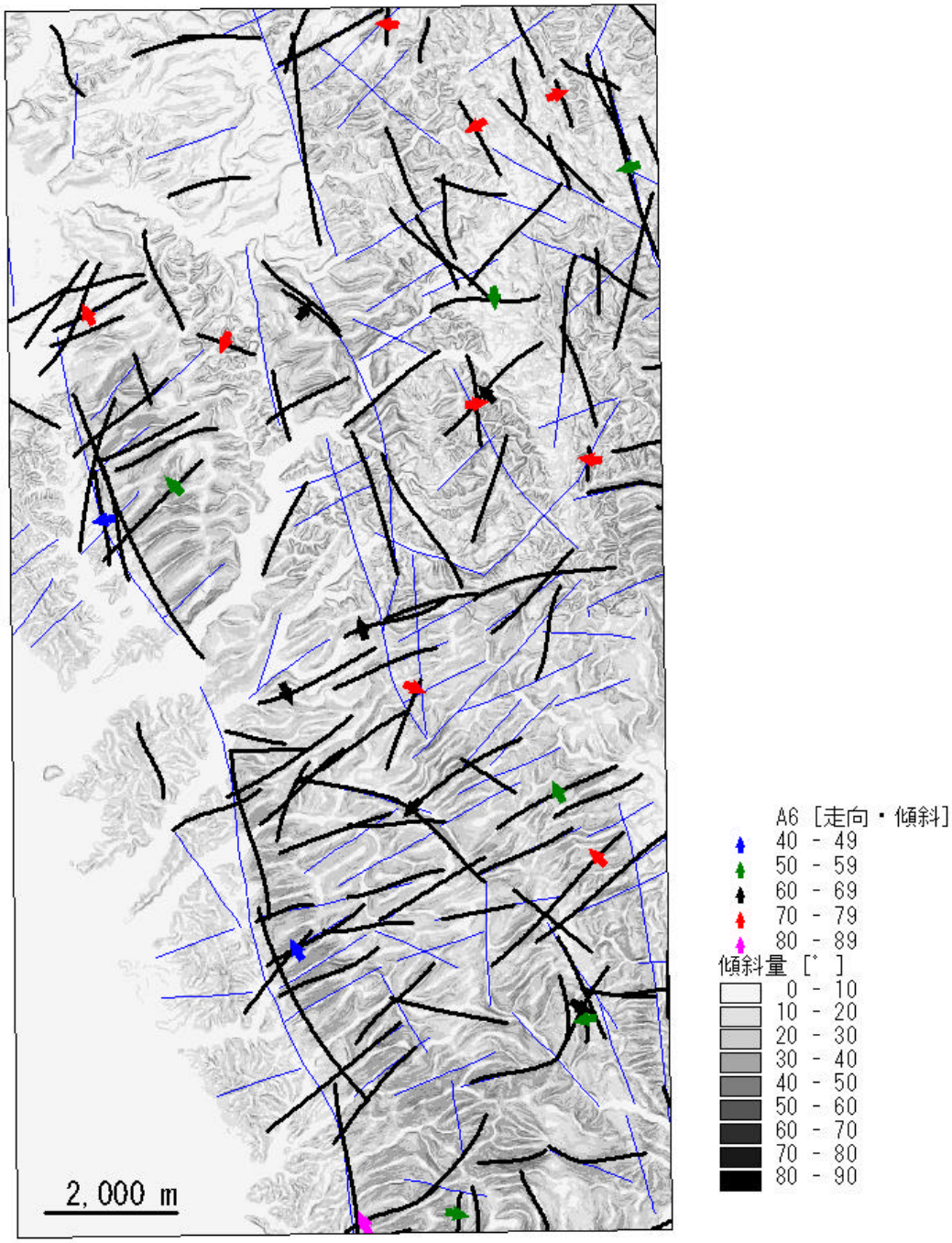
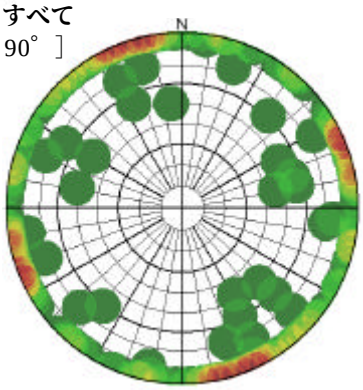


図 3.59　ケース A3 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
ケース A3： 探索距離上限＝300m　ふらつき許容量＝30m



リニアメントすべて
[計算不可は 90°]



傾斜が計算された
リニアメントのみ

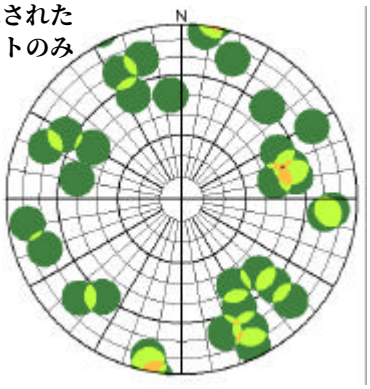
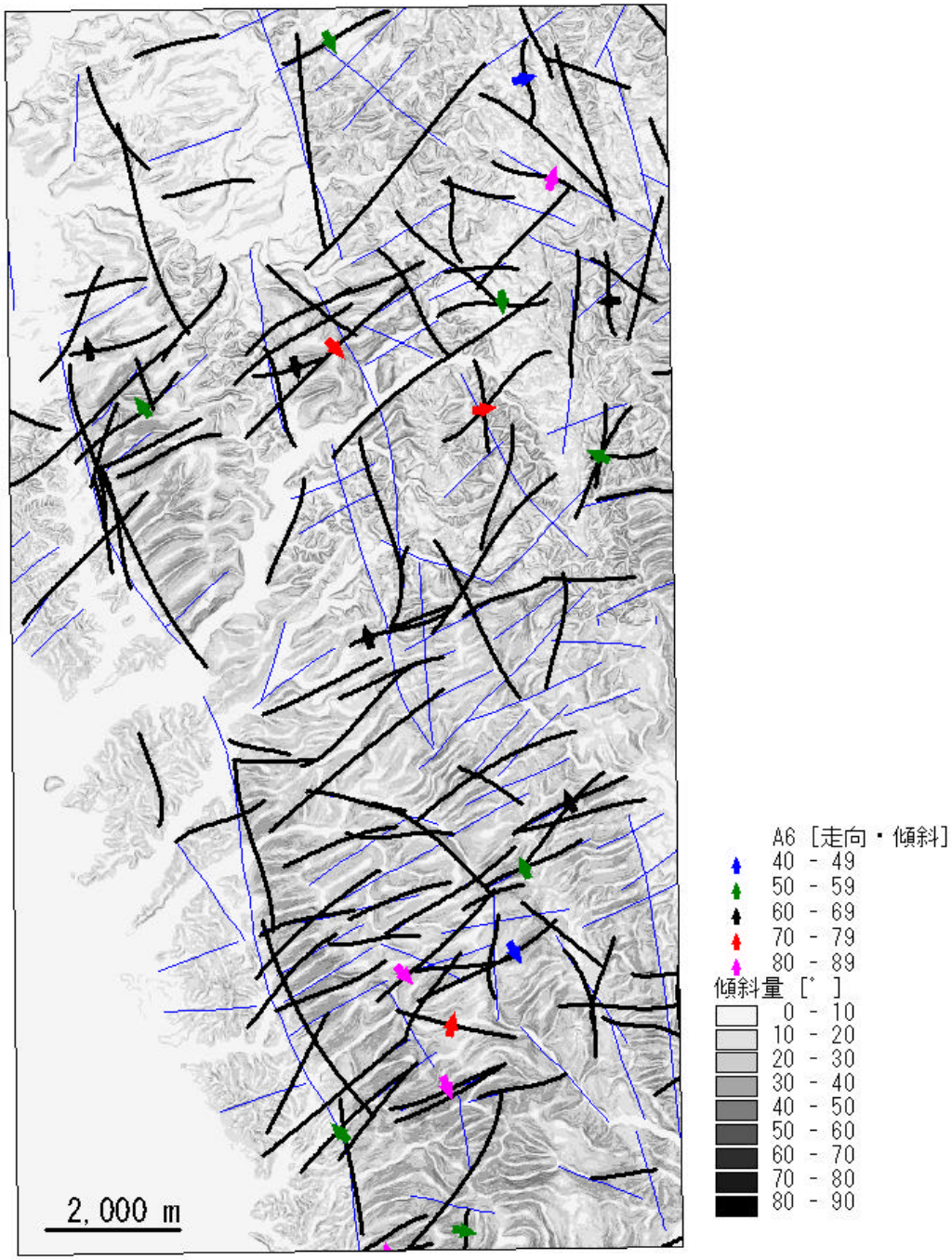
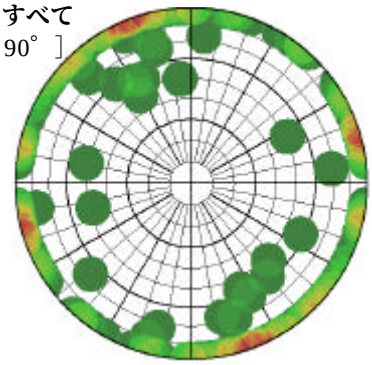


図 3.60　ケース A6 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
ケース A6： 探索距離上限＝300m　ふらつき許容量＝60m



リニアメントすべて
［計算不可は 90°］



傾斜が計算された
リニアメントのみ

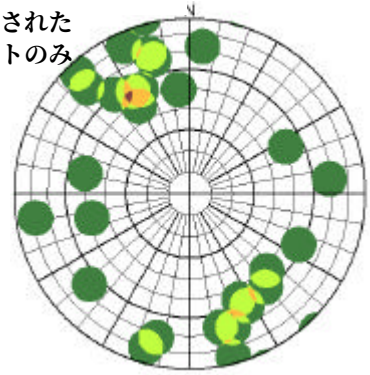
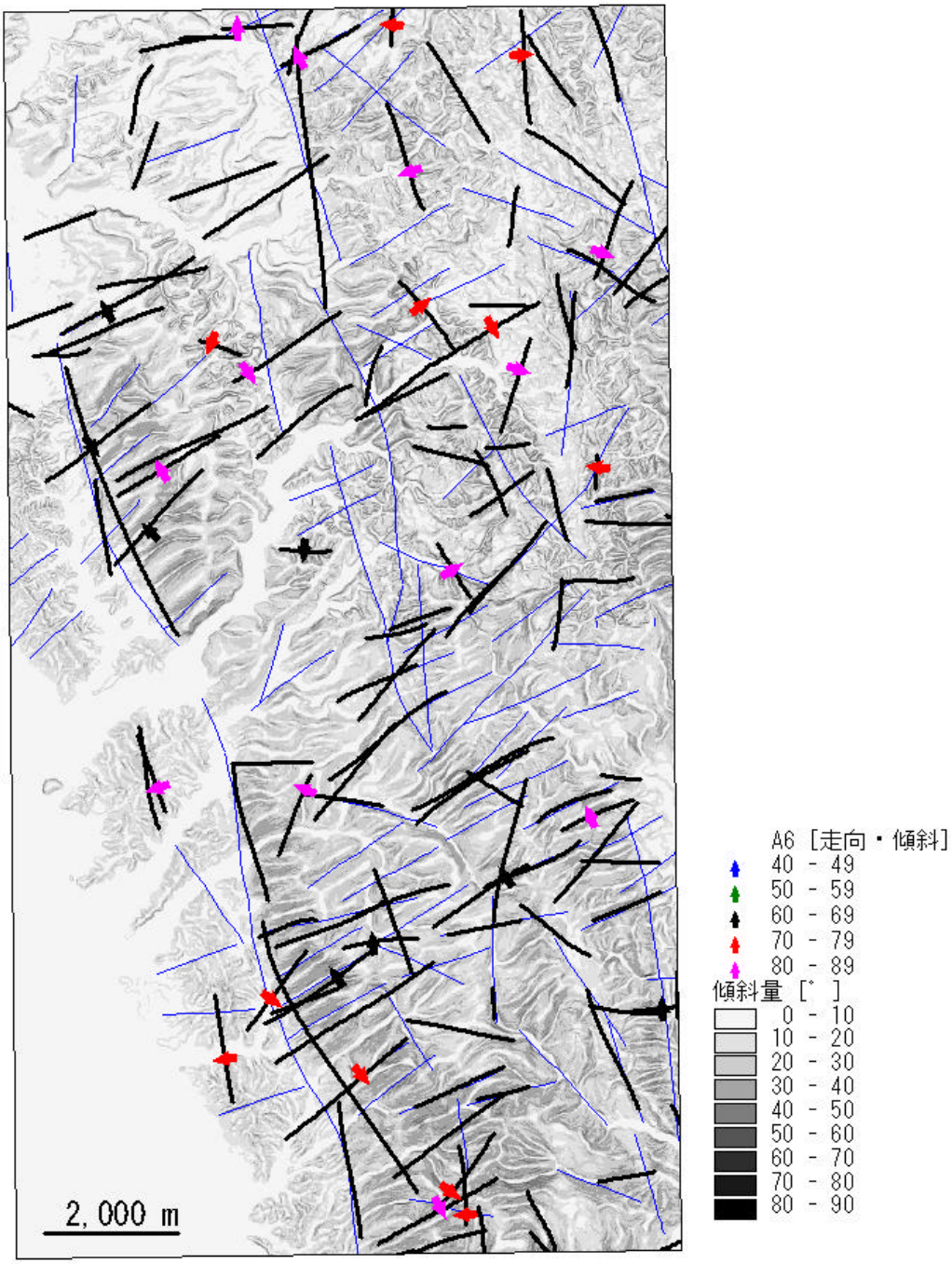


図 3.61　ケース A9 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
ケース A9： 探索距離上限＝300m　ふらつき許容量＝90m



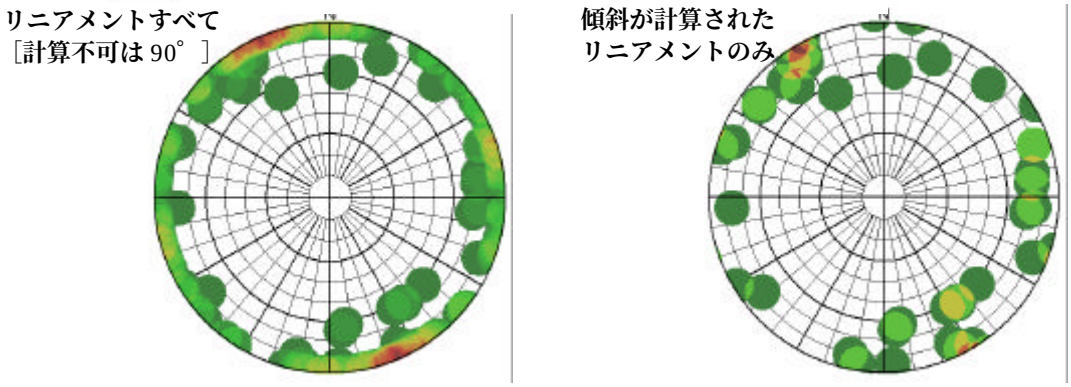
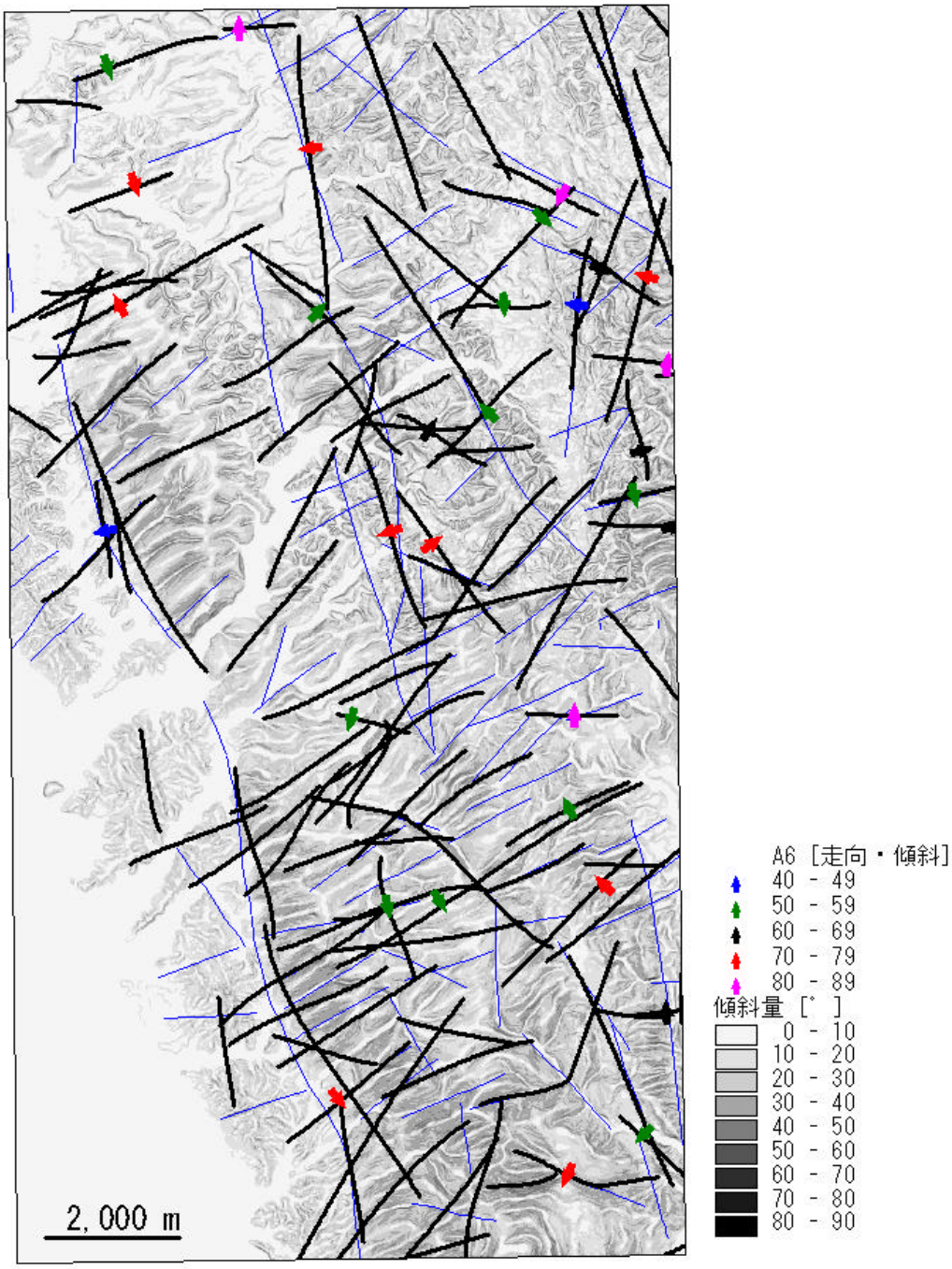
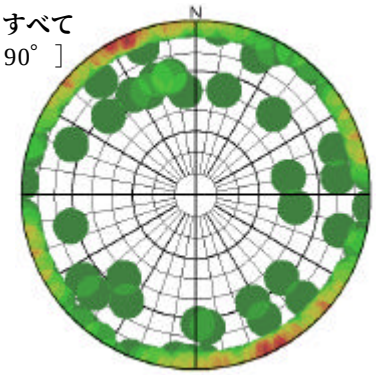


図 3.62　ケース B3 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
ケース B3： 探索距離上限＝600m　ふらつき許容量＝30m



リニアメントすべて
［計算不可は 90°］



傾斜が計算された
リニアメントのみ

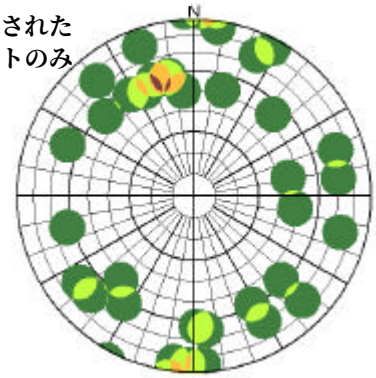
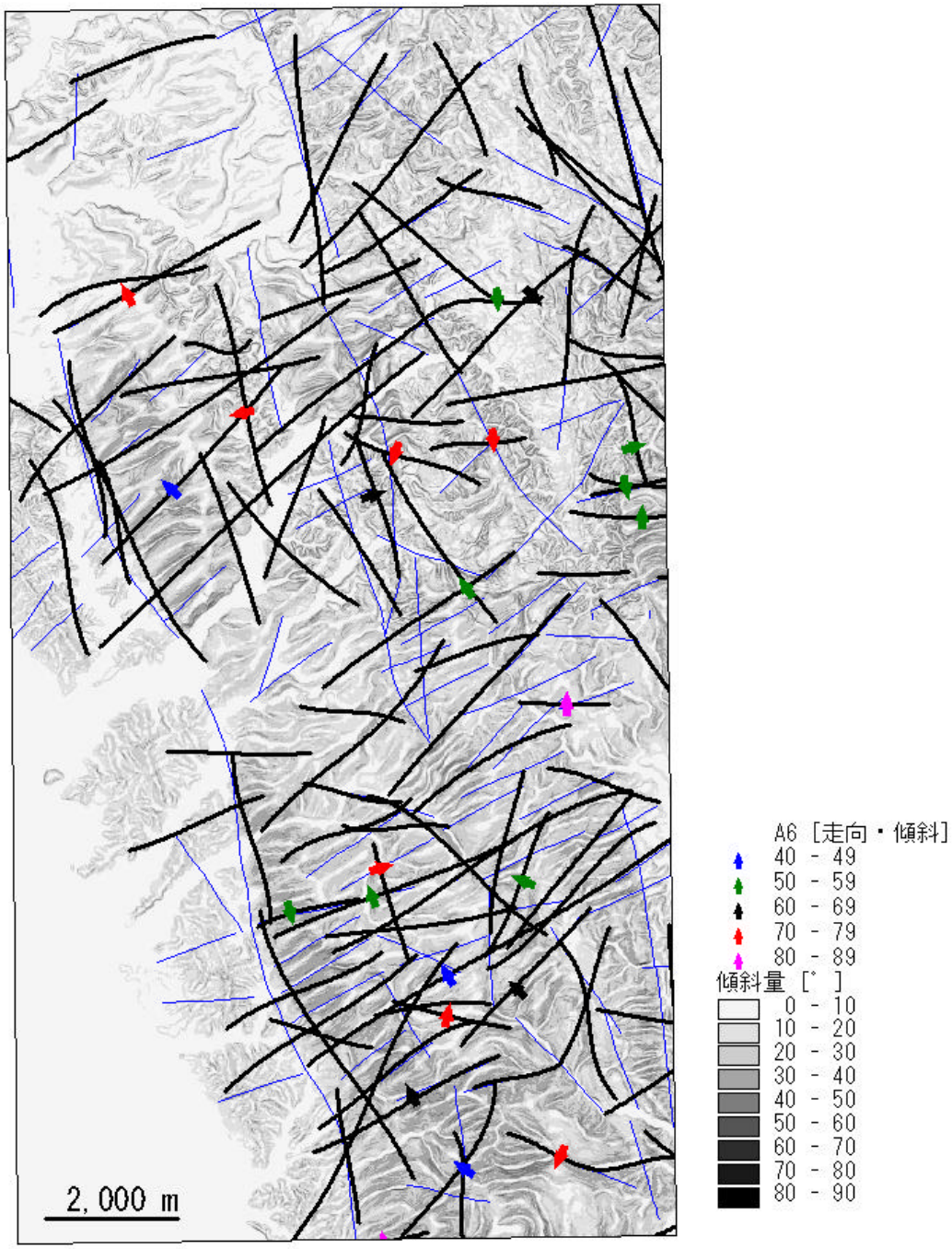
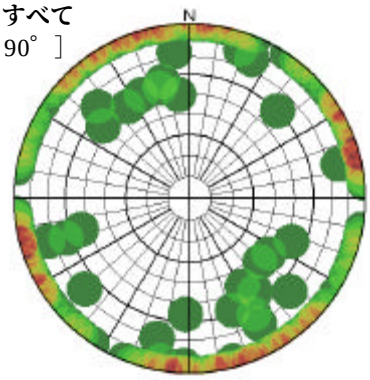


図 3.63　ケース B6 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
ケース B6： 探索距離上限＝600m　ふらつき許容量＝60m



リニアメントすべて
［計算不可は 90°］



傾斜が計算された
リニアメントのみ

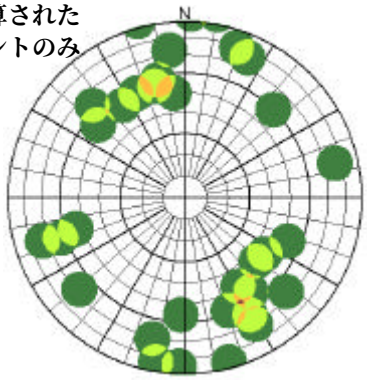
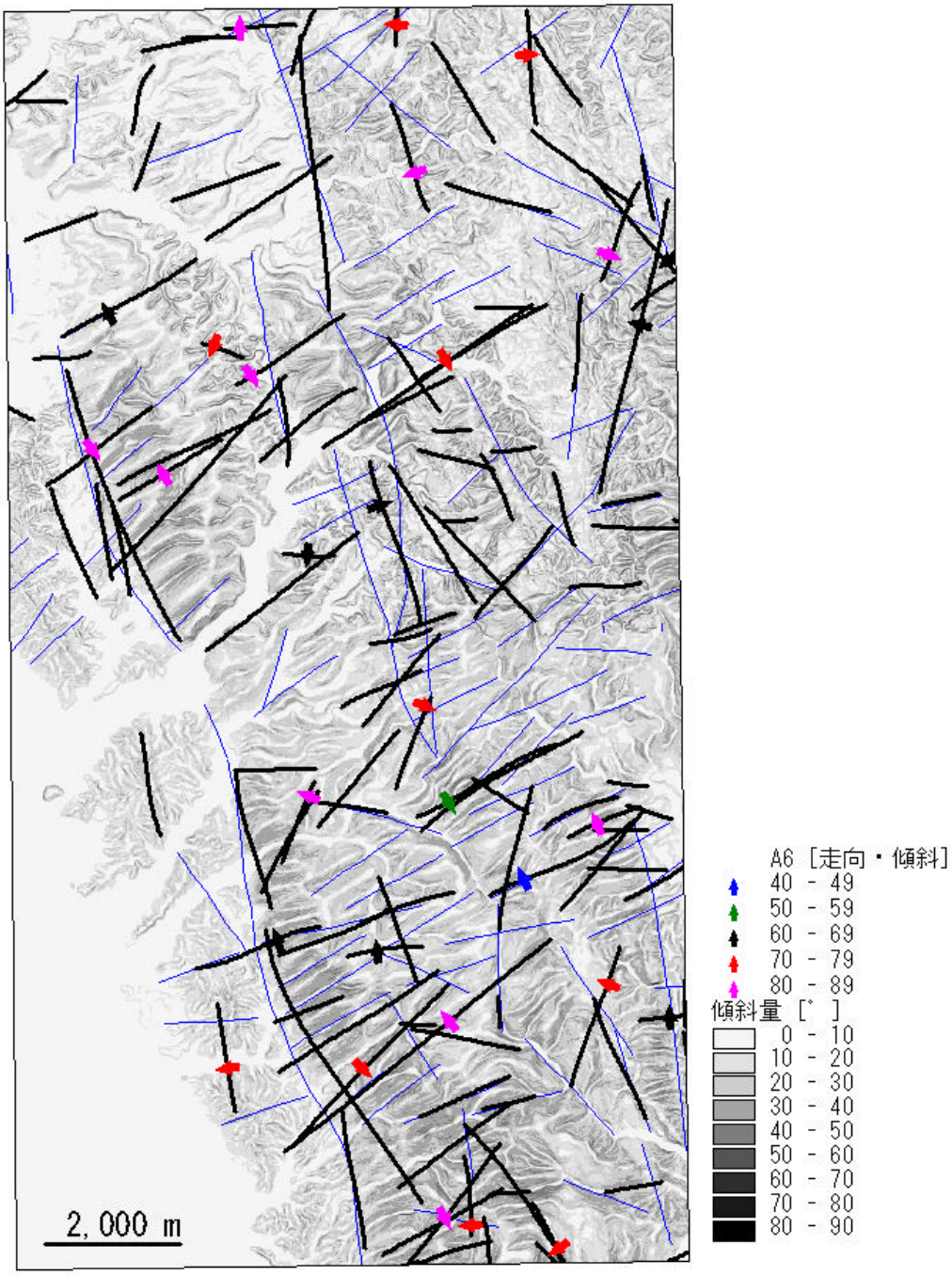
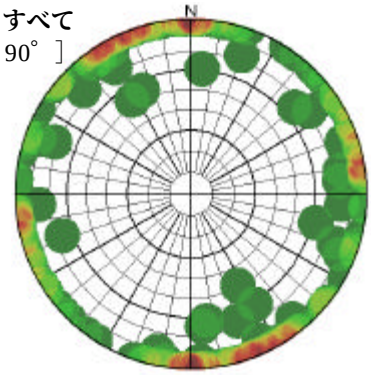


図 3.64　ケース B9 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
ケース B9： 探索距離上限＝600m　ふらつき許容量＝90m



リニアメントすべて
［計算不可は 90°］



傾斜が計算された
リニアメントのみ

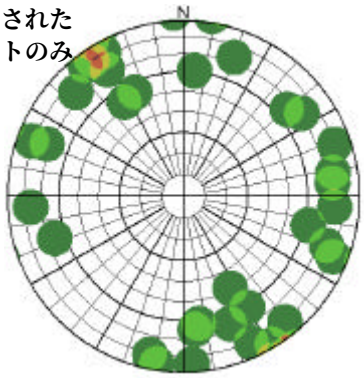
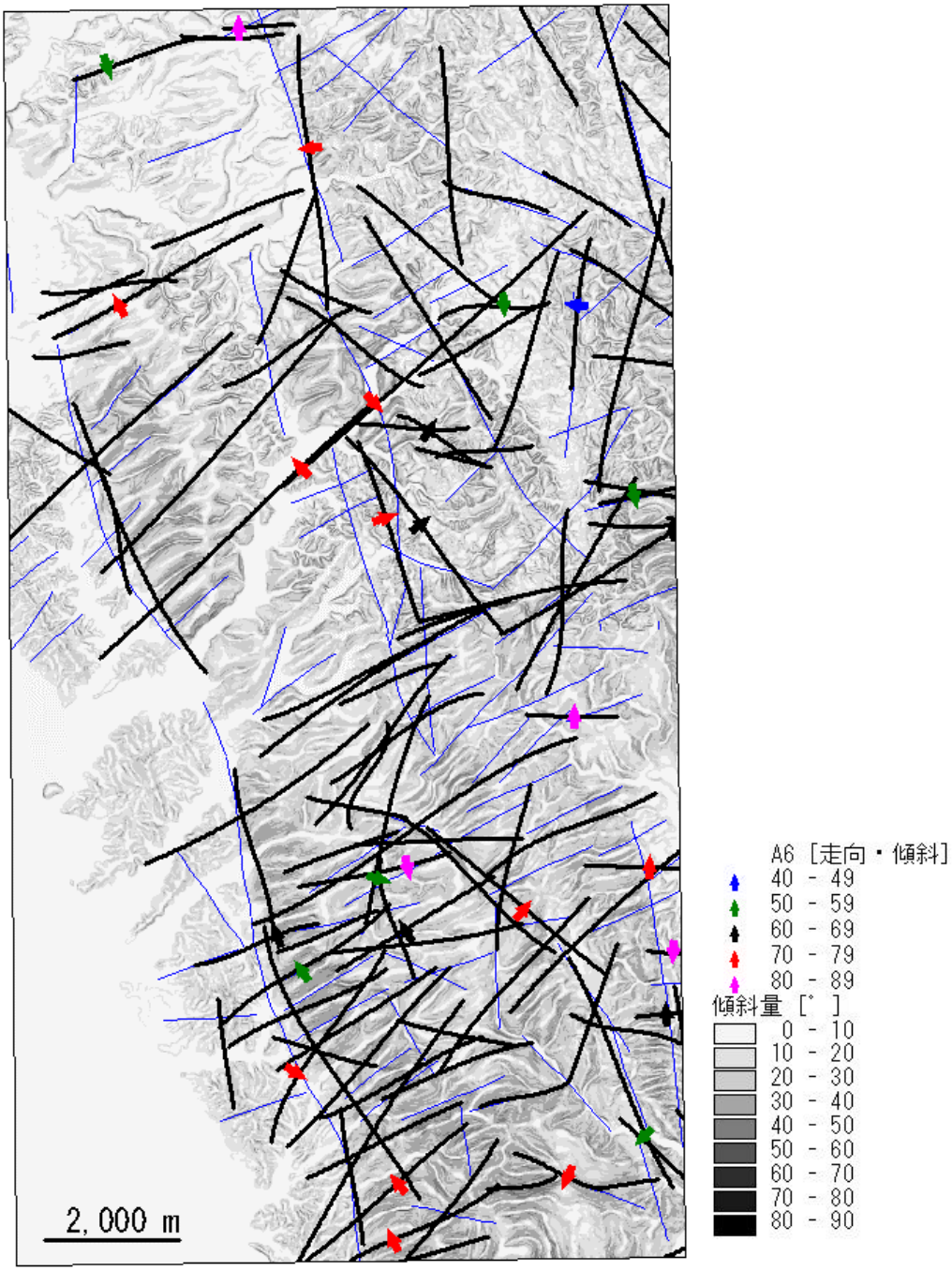


図 3.65　ケース C3 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
ケース C3： 探索距離上限＝900m　ふらつき許容量＝30m



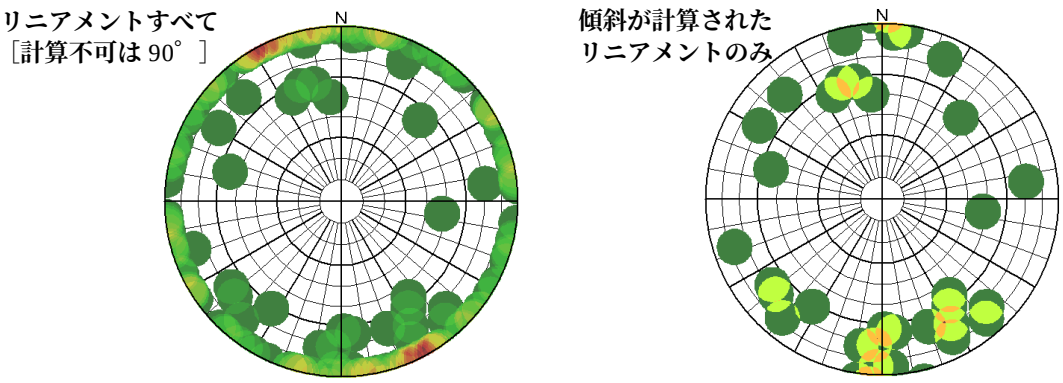
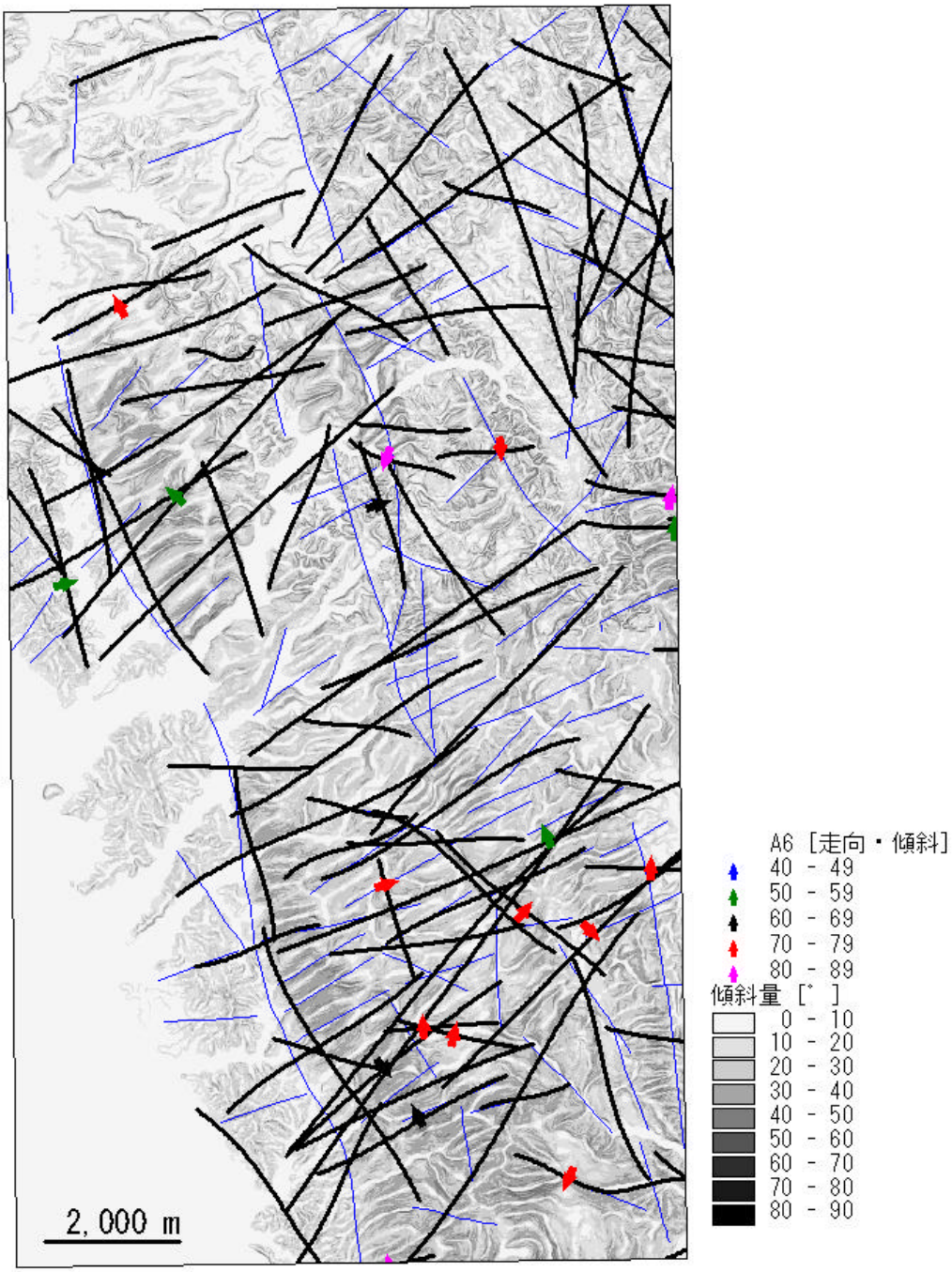
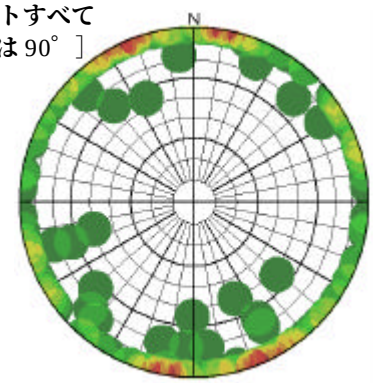


図 3.66　ケース C6 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
ケース C6： 探索距離上限＝900m　ふらつき許容量＝60m



リニアメントすべて
［計算不可は 90°］



傾斜が計算された
リニアメントのみ

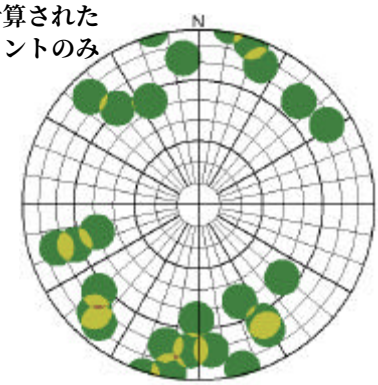


図 3.67　ケース C9 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
ケース C9： 探索距離上限＝900m　ふらつき許容量＝90m

４．本解析のまとめと検討

本章では，前章で得られた解析結果や決定したパラメータのまとめと，推定されたリニアメントとリニアメント判読図や地質図との対比を行い，今後検討しなければならない課題についてまとめる。

4.1　地形構造特性

図 3.6 で示したように，1/25,000 地形図 12 図幅の 10m メッシュ DEM から傾斜のセミバリオグラムを領域・方位別に作成した。この結果，12 図幅全域では NNW-SSE～N-S 方向の異方性があることが明らかとなった。領域別にこれを検討すると，北西部域(稚咲内，幌延，音類北部，振老北部)では，NW-SE～NNW-SSE 系が，南西領域(音類南部，振老南部，天塩，更岸)では N-S 系の異方性が強く，南から北に向かって北西方向に構造が変化することを示す結果となった。また，南東側(安牛南部，上問寒別南部，雄信内，問寒別)では NNW-SSE～N-S 系が，北東部(本流，豊神，安牛北部，上問寒別北部)では N-S 系の異方性が強くなっている。以上の結果から，12 図幅の領域では，N-S～NNW-SSE 方向の構造が卓越するが，この構造は北西領域で構造方向が北西方向へ変化することが特徴と言える。

この特徴は地質調査所　縮尺 1/500,000 活構造図(旭川)をコンパイルした図 3.5 の活褶曲および褶曲構造と一致しており，地質構造に対応する地形構造をセミバリオグラムによって数量化することができることが明らかとなった。

傾斜を利用したセミバリオグラムによる地形構造の数量化は，セミバリオグラムを計算する必要から，ある程度広い面積が必要である。これは，領域が狭いとセミバリオグラムを計算するデータ対が十分得られないため，セミバリオグラムが細かな振幅を持ち，形状が不安定になることによる。今回の解析では，縮尺 1/25,000 地形図 12 図幅を 4 分割し，それぞれの領域(3 図幅分)から安定したセミバリオグラムを得ることができた。したがって，これより狭い領域でセミバリオグラムから構造特性を数量化できる可能性を示しており，より分解能の高い構造解析解析結果が得られる可能性もある。

4.2　流路の定義と流路密度

リニアメント自動抽出では，直線的な流路からなる地形特徴から抽出したリニアメント数が最も多くなる。この時に利用される流路は，谷頭を集水面積で定義する方法が一般的に用いられる。しかしながら従来法では，急斜面では判読した位置よりも下流側に谷頭が位置する。逆に，緩斜面では判読した位置よりも上流側に谷頭が位置し，凹型の地形特徴が認められなくとも流路が形成されてしまう欠点がある。したがって従来法では，流路は地形情報を正しく反映していないといえる。

ここでは，従来法(谷頭を集水面積で定義)にかわり，流路の断面形状が急変する位置をもって谷頭と定義した。断面形状は流路の左右 5 メッシュ(50～70m)でラプラシアンを計測す

ることで求められる。谷頭は上流側から計算してきたラプラシアンが，初めて閾値を超えた地点と定義する。この閾値を 0.15，0.25，0.35 として抽出される流路の検討を行った。その結果，閾値を 0.25 とした結果が，最も良好であると判断した。なお，閾値を 0.15 とした場合には，判読では流路としないわずかに凹みのある斜面を谷頭としてしまう。逆に閾値を 0.35 としてしまうと，流路と判読される明らかな凹地形であっても流路とされないケースがある。

谷頭の閾値はもう少し細かく検討する必要があるが，おそらくは閾値を 0.20～0.25 程度に設定すれば良好な結果が得られると考えられる。この数値は地域依存性があるものではなく，その他の地域へも適用できる数値であると考えられる。

なお，谷頭をラプラシアンで定義する場合には，地形図の縮尺に相当する DEM の空間分解能に依存する。したがって，異なる空間分解能の DEM を利用する場合には，谷頭を定義する閾値を再度検討する必要がある。

このように流路を定義した流路網図では，図 3.12 に示したように流路密度に差が現れる。本地域では，声問層上部や増幌層で流路密度が高く，硬質頁岩からなる稚内層では流路密度は低くなっており，密度差の境界は，地質境界と比較的良く一致する結果が得られた。

地形特徴からリニアメントを抽出する際には，このようにして抽出された流路情報を利用する。ただし，平坦部を流れる流路は位置精度が正しくないことから，平坦部の流路情報は不要である。ここでは，流路を直線と見なせる区間に切断後，それぞれの流路について断面形状を計算し，平野部の流路を除去した。

平坦部を除去し，直線区間に切断した流路を方位別に色を変えて表示すると，図 3.47 で示したように対象地域の地形特徴が明瞭となる。本地域の流路特徴は，

①NE-SW の流路が卓越し，これと直交する NW-SE が 2 番目に多い十字型の流路網を構成する。

②NE-SW の流路は大地形の傾斜方向と一致する

③硬質頁岩からなる稚内層では，NE-SW 方向の流路が卓越する。また，流路密度が低く，ほぼ等間隔で並行する流路網を形成する

④稚内層では，NW-SE 方向の流路はほとんど発達しない

⑤声問層上部あるいは増幌層では十字型の流路が発達し，NW-SE～NNW-SSE 系の流路が長く，稚内層と対照的な流路網を構成する

ことがある。

このように流路網は地質を反映しているが，地質図に記載されている断層に相当する位置での流路の発達度は悪い。図 3.12 は流路網と幌延地域の詳細地質図(JNC TJ140098-001)を重ねたものである。山地/平地境界をなす大曲断層に相当する位置に流路がないことは当然としても，この東側に位置する幌延断層沿いでも，断層を示唆する流路の発達は極めて悪い。この意味で 10m メッシュ DEM を用いて地形特徴から断層に相当するリニア

メントを抽出するには非常に難しい地域であるといえる。

4.3　傾斜の変換線とその特徴

2.章に述べたアルゴリズムにしたがって，傾斜変換線の認識と連結による抽出を実施した。なお，認識した傾斜変換線の連結は，地形構造特性を反映させるものとした。

傾斜変換線の認識は，ラスタ情報として抽出された正のラプラシアン異常量図から方向検出オペレータを利用して，傾斜変換線を認識させる。このとき最も重要なパラメータは方向検出オペレータのサイズである。サイズが決定されれば検索距離の上限は，このサイズの 1.5～2.0 倍とできる。

方向検出オペレータのサイズの検討のため，スリット長を 48,72,96,144 メッシュ(480～1,440m)と変化させ，傾斜変換線の認識と連結を行った。この結果，傾斜変換線の方位特性は ENE-WSW 方向が卓越し，いずれの結果とも類似したものとなった。ただし，対象地域の地形規模を考えると方向検出オペレータのサイズは 960m や 1,440m では大きすぎると言え，1 斜面に複数本の傾斜変換線を認識させるため 480m のサイズを利用するものとした。

なお，検出される傾斜変換線の多くは図 3.13 に示したように NE-SW～ENE-WSW(方位角 50～60°)方向が卓越することが特徴となっている。対象地域の流路の卓越方向は NE-SW 方向(方位角 40～50°)であり，流路の卓越方向と，傾斜変換線の卓越方向はやや異なることが特徴である。

連結された傾斜変換線の分布では，大曲断層の東側に分布する稚内層では，ほぼ NE-SW～ENE-WSW 方向の傾斜変換線のみからなり，これらは谷の斜面中腹にその多くが認められる。不可解な点は，図 4.1 に示すように北側斜面の抽出されているケースが多い点である。

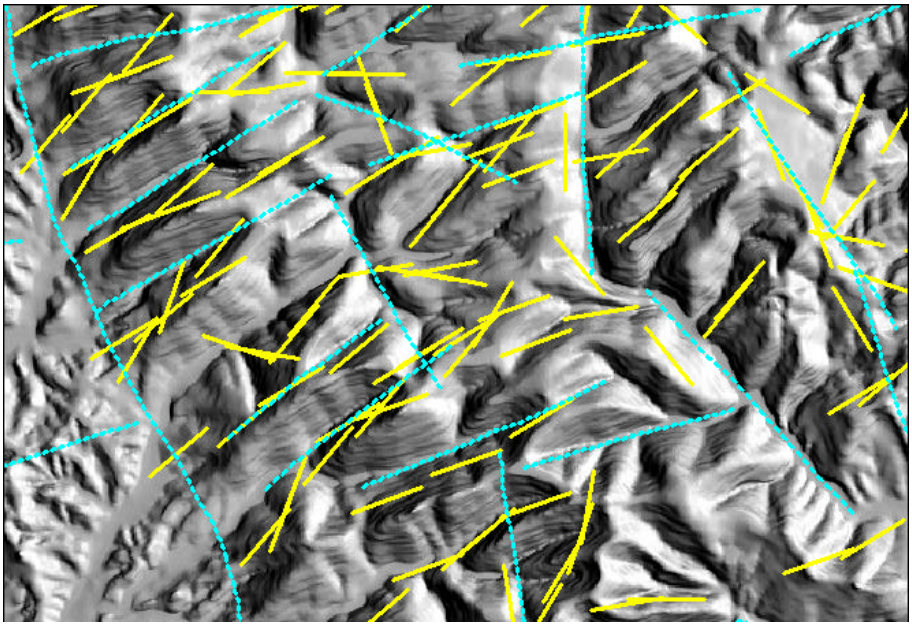


図 4.1　連結された傾斜変換線(オペレータサイズ＝480m)
黄色線 :連結された傾斜変換線　水色 :判読されたリニアメント 図の幅は 5.7km

この地域の堆積岩は，構造と平行する NNW-SSE であり，地層の硬軟によって形成された傾斜変換線ではない。

なお，図 4.1 で示したように DEM には等高線と平行する縞(緩急の繰り返し)が認められる。これは等高線からの DEM の内挿時に発生したものであると考えられ，自然にはこのような地形はないものと考えられる。傾斜変換線の一部はこのような DEM の特徴(ノイズ)を検出した可能性もある。

対象地域で抽出された傾斜変換線の特徴は，構造と直交する ENE-WSW～NW-SE 方向が卓越する点にある。これまでに他地域で本手法を適用した場合には，構造と平行する傾斜変換線が多く抽出される。

本地域の斜面方位の特徴は，図 4.2 で示すように構造と平行する斜面(東ないし西傾斜の斜面)が極めて少ないことがある。傾斜変換線は斜面沿い(落水線方向)にラプラシアンを計測し，傾斜変換線を検出する。したがって，計測する斜面が少ないため，傾斜変換線がほとんど検出されないことが原因となっている。

なお，本地域で決定した方向検出オペレータのサイズは，おそらく他地域に適応した場合でも大きく変化しないものと考えられる。

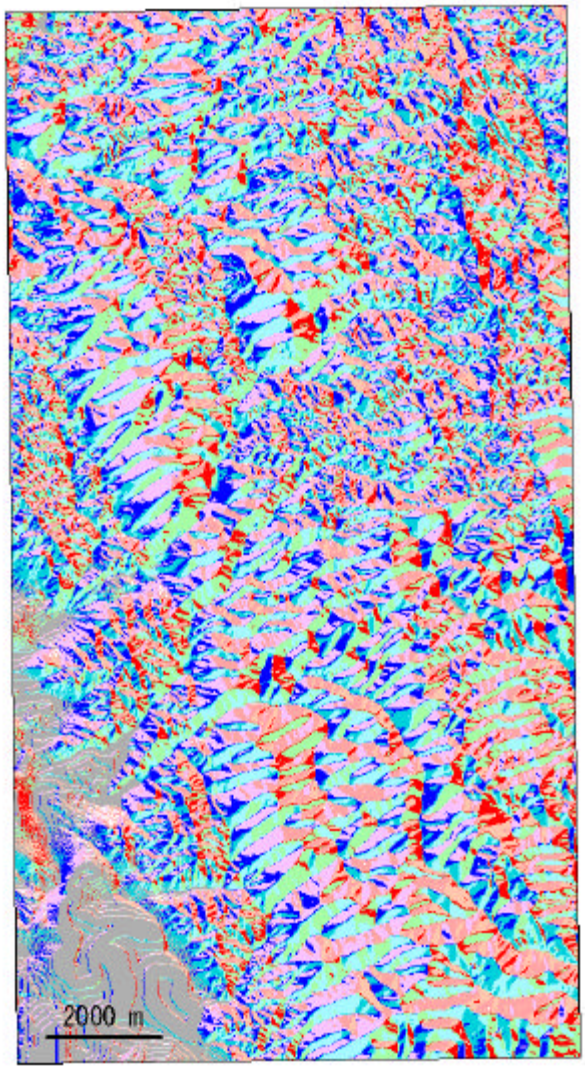


図 4.2 斜面方位図
青 :西向き斜面 赤 :東向き斜面

4.4　山地/平野直線境界の検出

山地/平野直線境界は，巨視的に地形を眺めた場合の直線的な傾斜急変点を検出することで認識される。ここでは 2.章の手順に従って切峰面図に類した最大傾斜量図を作成し，この空間解像度を低下させた状態で，ラプラシアン異常の直線性から山地/平野直線境界の検出を行った。

山地/平野直線境界の検出で，結果を左右するパラメータとしては傾斜変換線の検出と同様に方向検出オペレータのサイズがあり，これ以外に最大傾斜量図を作成する際のメッシュ間隔がある。このメッシュ間隔は，どの程度の規模の地形を消去するかによって決定される。本解析ではメッシュサイズを 2 種(350,500m)，オペレータサイズを 2 種(1440,1920m)および検出した線素を連結する検索距離上限を 2 種(1440,2880m)とし，この組合せによって 8 ケースの解析を行った。

解析の結果，検出された山地/平野直線境界はメッシュサイズ=350m，方向検出オペレータのサイズ＝1440m，検索距離上限＝2880m の組合せ結果が最も良いと判断した。このメッシュサイズは，大曲断層を横切る流路間隔(約400m)とほぼ等しい値であり，これら流路による谷地形をほぼ消去することができる。また，方向検出オペレータのサイズは 3 つの尾根にまたがるサイズであり，直線性を検討する上でもこの程度のサイズは妥当であると言える。

図 4.3 ではこのパラメータで検出された山地/平野直線境界を赤点線で，判読されたリニアメントを青点線で，幌延地域の詳細地質

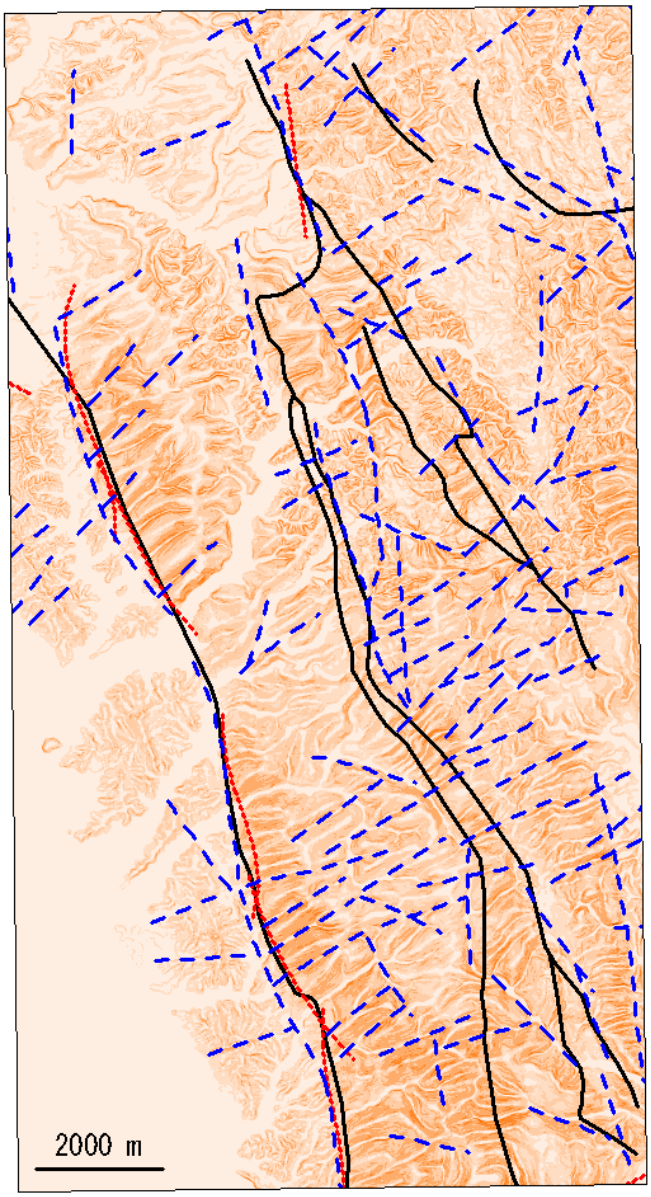


図 4.3　決定した山地/平野直線境界
メッシュサイズ=350m
方向検出オペレータのサイズ＝1440m
検索距離上限＝2880m
黒線 :地質図の断層
青破線 :判読したリニアメント
赤点線 :検出した山地/平野直線境界

図の断層を黒実線で示した。

大曲断層に相当する判読したリニアメントは，より西側の山麓に近い点を結んだ位置となっている。これに対し検出された山地/平野直線境界はやや東よりの斜面下端付近を結んだ位置となっている。この違いは，山地/平野直線境界は傾斜が大きく変化する点を結んでいることによる。また，一度解像度を 1/4 に低下させており，このことも位置が合わない理由の 1 つである。

図 4.3 では検出された山地/平野直線境界の位置は，判読されたリニアメントよりもむしろ地質図の断層位置とほぼ一致している。ただしこれは偶然の一致かもしれない。

上述したように山地/平野直線境界の検出方法はあまり論理的ではなく，その地域に認められる地形特徴からパラメータを定義しなければならない。また，異なる地形特徴からなる山地/平野直線境界が 1 つの対象地域内に複数ある場合もあり得る。したがって，いくつかのパラメータを準備しておき，いくつかの結果から取捨選択することも考えられるが，これも恣意的であるといわざるを得ない。

この検出方法については，今後検討する必要がある。

4.5　スコアリング重みの決定

アルゴリズムの流れとしては，連結パラメータを定義した後にスコアリング項目間の重みを定義する。ただし，図 3.58 で示したようにスコアリング時の項目の重みを定義してしまえば，連結パラメータを変更しても抽出されるリニアメントの方位特性は大きく変化しない。よって，本解析では，線素を連結した１つの結果を利用し，先にスコアリングの重みを決定した。

スコアリング項目は 4 項目とし，①グループの地形形状(凹地形の険しさ)，②グループ方位，③グループ長，④グループの線素構成比とした。

①はグルーピングした地形特徴が明瞭か，不明瞭かの尺度となる。②は大局的な構造と平行する地形特徴は，より重要であるとの観点からグループの評価を行うものである，③はリニアメント判読時には，判読されるリニアメントに下限を設ける場合が多いことを反映させている。④はグルーピングされた長さのなかで，リニアメントと判別される地形特徴がどの程度占めるかを数量化したものであり，これも①と同様にリニアメントが明瞭か不明瞭かの尺度となる。

項目間に重みをつける理由は，判読がすべてを一律の重みで評価していないことによる。例えば，谷形状が浅くても，これが長く連続しているようであればリニアメントとして抽出される。また，谷が深く明瞭な直線性を持っていたとしても，連続性に乏しければリニアメントとして抽出されないケースも当然あり得る。

ここでは，項目間で得たスコアに項目の重みを乗じてスコアを合計し，高得点のグループほど確実度の高いリニアメントとして抽出するものとした。ただし，判読されたリニアメントは地形形状だけではなく，地質などを考慮している。また，地形特徴として評価し

にくい河川の屈曲などからリニアメントを判読する場合もある。したがって，高スコアの地形特徴を持つグループは必ずしも判読されたリニアメントに対応するものではないし，判読されたリニアメントがグループにも抽出されていないケースも往々にしてある。

本解析が目的とするものは，地形特徴の連続性から明確な定義でリニアメントを抽出することにある。したがって，個々のリニアメントの位置よりもリニアメントの分布密度や方位特性を重視する。無論，判読されるリニアメントと一致するような明確な定義が存在すればベストである。しかしながら判読の基準が物理的な量として明らかにされない以上，自動抽出の結果と判読結果を一致させることは不可能に近い。なお，最終的な目標は，項目間の重みをはじめ，各パラメータを統一したリニアメントの自動抽出方法の確立にある。これが確立できれば，断裂系の発達度を他地域と定量的に比較する，あるいは広域的な断裂系の評価，断裂系による地下水流動解析などへ応用できる解析方法となると考えられる。

以上の観点から，本解析では判読されるリニアメントの分布特性や方位特性を重視し，項目間の重みを決定するものとした。

スコアリングは項目間の重みを変更するものとし，表 3.3 の 9 種について検討を行った。この結果，グループ長(×2.0)，線素構成比(×1.5)に重点を置き，地形特徴(×1.0)や方位特性(×0.5)には重点を置かなかったケースで，判読したリニアメントの方位特性と類似する結果が得られた。なお，方位特性に重点が置かれなかった理由は，連結時などですでに構造特性が考慮されているためかもしれない。

決定した項目間の重みは，現時点では対象地域のみに適用できるものである。ただし，傾斜変換線や連結されたグループでの方位特性は，判読されたリニアメントに近い方位特性を持つものであり，項目間の重みが大きく変更される可能性は低いと考えられる。これについては今後の検討を要する。

4.6　線素の連結パラメータの検討

以上のようにして決定したスコアリング時の重みを用いて，検出された線素から線素の連結を行った。連結パラメータは，検索距離上限を 3 種(300,600,900m)とふらつき許容量を 3 種(30,60,90m)の合計 9 ケースについて検討を行った。

連結距離やふらつき許容幅を大きくすると，グループ間の連結が進むことからグループ長は長くなる。ただし，連結距離を 900m とした場合や，ふらつき許容幅を 90m にした場合など連結できる基準を緩くすると，スコアリング後に篩い分けられたリニアメントの交叉が著しく多くなること，また，図 3.58 の様に方位特性がケースによってやや変化し，抽出結果がやや不安定になることが明らかとなった。

篩い分けられたリニアメントの方位特性が比較的安定し，また，判読結果と類似する連結パラメータの組合せは，検索距離上限を 600m 以下，ふらつき許容量を 60m 以下とする 4 つケースである。この 4 つの組合せのうち検索距離上限を 600m，ふらつき許容量を 60m としたケースでは，図 3.63 の様にやや長目のリニアメント(平均長 2,260m)が篩い分けられ，

また，リニアメント同士の交叉もやや多い。したがって，本地域では検索距離上限を 300m，ふらつき許容量を 60m 以下にする，あるいは，ふらつき許容量を 30m とし，検索距離上限を 600m 以下とし，連結条件を比較的厳しくする方が良好な篩い分け結果を得られると結論した。

なお，前述したように連結パラメータを変更しても篩い分けられるリニアメントの方位特性に大きな変化は認められない。従って，他地域でこのパラメータを検討してもそれほど大きな変化はないものと推定される。

4.7　リニアメント篩い分けの閾値の検討

連結されたグループの篩い分けを行う際には，何らかの閾値が必要となる。ここでは獲得スコアの上位 5%程度が抽出される値を閾値とした。したがって，この閾値は相対的なものであり，リニアメントの分布密度などを他地域と比較することはできない。

閾値を定義するためにはスコアリング方法を相対的な評価から絶対的な評価へと変更する必要がある。

①地形形状

現在はグループ全体のラプラシアン(凹型度)を計算し，平均からの乖離(標準偏差)を利用してスコアリングを行っている。これについてはいくつかの事例を検討すれば，比較的容易に定数化できるものである。

②方位特性

既に地形構造の数量化によって定式化されている。

③長さ

現在は連結された平均長を利用して相対的な長さの比からスコアリングを行っている。これについても，いくつかの事例を検討すれば，比較的容易に定数化できると考えられる。

④線素構成比

これは 1 グループ内での相対長を利用することから，すでに定数化されている項目である。

以上のように，①と③の項目を定数化すれば，スコアリングの曖昧性は無くなる。これらを定数化すれば，獲得スコアは常に絶対値として得られることから，閾値も定数とすることができる。したがって，自動抽出結果の地域間での比較が可能となり，客観的な基準で解析したリニアメント分布図を作成することができる。

4.8　リニアメントの傾斜推定

篩い分けられたリニアメントを構成する線素について，リニアメント毎に投影断面を作成し，投影断面の点の分布からリニアメントの傾斜推定を行った。抽出されたリニアメントは 130～140 本程度であり，このうち投影断面の点が相関性を持つリニアメント(R^2>=0.5)は，20%程度(30 本)前後であった。

この計算された傾斜は，偶発的に計算される場合もある。ただし，偶発的に計算されるリニアメントの傾斜は，ランダムに計算されると考えられる。したがって，特定の領域に傾斜が偏って計算される，あるいは同方向のリニアメントについて一方のみの傾斜が現れるケースでは，断裂面などの構造を反映している可能性が高いと判断する。

本地域では解析対象面積が狭いこともあり，傾斜が計算されたリニアメント数は 30 本前後と少ない。ここでは，解析結果が比較的類似する 3 つのケース(表 3.7 のケース A3,A6,B3)で計算されたリニアメントの傾斜から，シュミットネットを作成し，傾斜の検討を行った。

図 4.4 は A3，A6 および B3 で抽出されたリニアメントを合わせて表示した。なお，3 者が重複するリニアメントがあるが，ここでは重複を許している。この状態で傾斜が推定されたリニアメントのシュミットネットを作成すると，図 4.4 右下が得られる。このシュミットネットの特徴は，

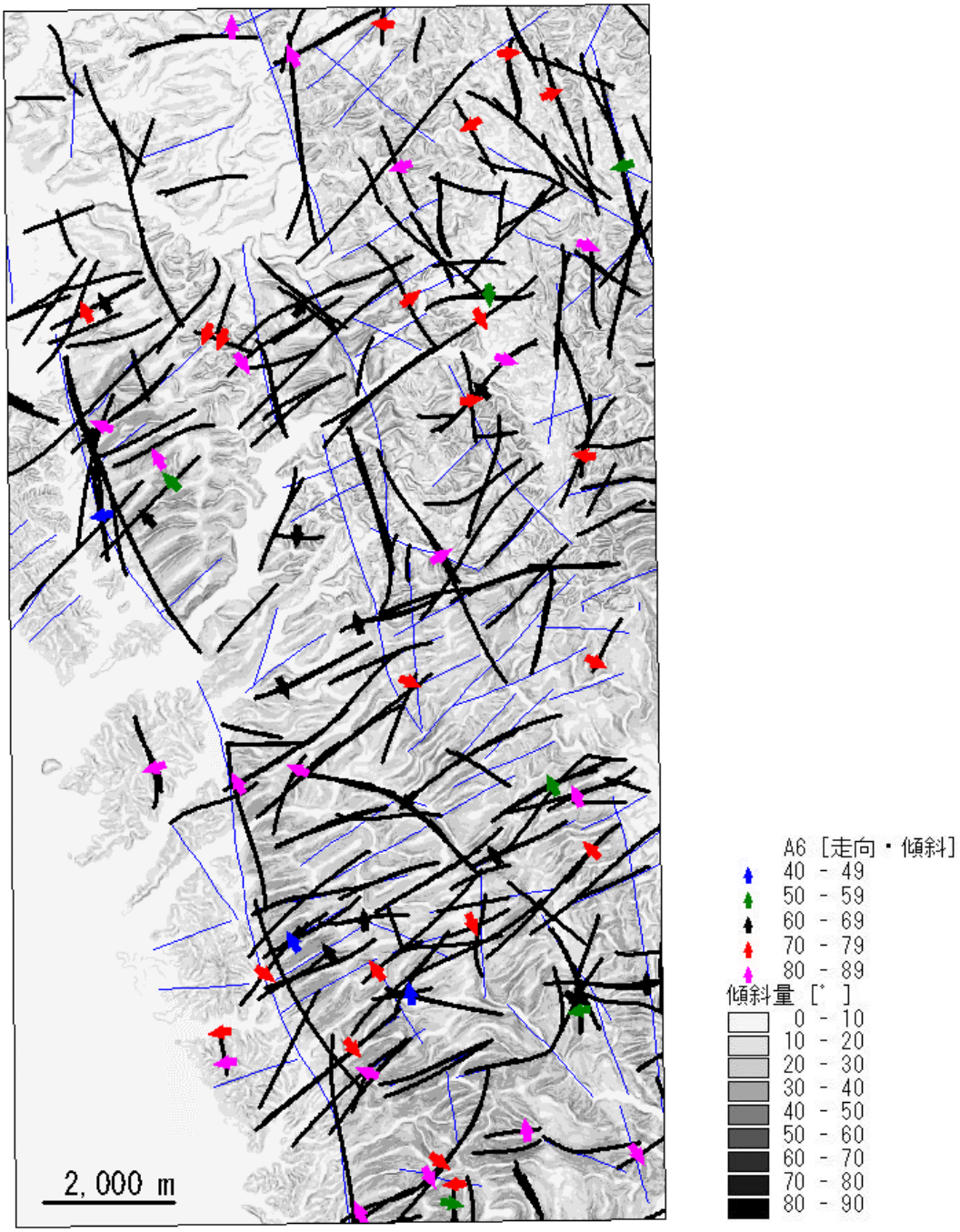
①ENE-WSW 系のリニアメントは南・北傾斜とも概ね同じような出現頻度である

②NNW-SSE 系のリニアメントは東傾斜がやや多く推定される

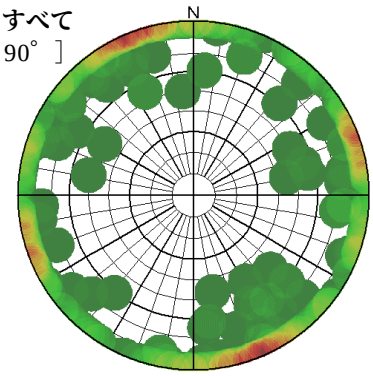
③大曲断層西方の丘陵部で認められる NNW-SSE のリニアメントは西傾斜を示すことがある。

図 4.5 は，A3,A6,B3 を重ね合わせたリニアメントから，2 つ以上が重複するリニアメントのみを抽出したものである。なお，リニアメントが重複していてもケースによってリニアメント長が異なるため完全に重複しない場合もある。この場合には，3 つが重複する領域，2 つが重複する領域にリニアメントを切断して表示した。また，リニアメントが完全に重複せず，平行にずれている場合には両者の中間にリニアメントを移動させた。

このように複数の結果で，同じ位置にリニアメントが抽出された場合には，その確実度が高いと判断した。図 4.5 の中央下は重複するリニアメントのローズダイアグラムである。この方位特性と判読されたリニアメントの方位特性(右下)を比較すると，判読されたリニアメントでは NW-SE 系リニアメントの頻度がやや多いが，その方位特性はかなり類似したものとなっている。また，判読されたリニアメントでは最も卓越する ENE-WSW 系に直交するリニアメントは少なく，直交方向からわずかにずれた N-S ないし NW-SE 系リニアメント(両者のなす角は 70°)が多く判読されている。図 4.5 および図 3.58 の A3,A6,B3 でも直交方向のリニアメントは卓越しておらず，直交方向よりもわずかにずれた N-S 系(両者のなす角は 70°)が発達するなど，類似した方位特性を持つリニアメントが抽出されている。



リニアメントすべて
［計算不可は 90°］



傾斜が計算された
リニアメントのみ

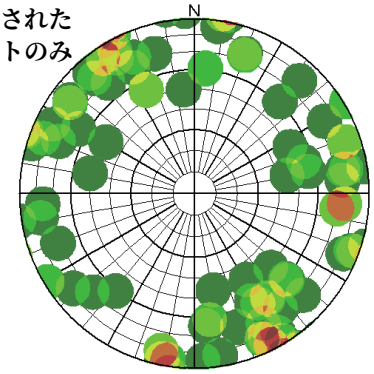
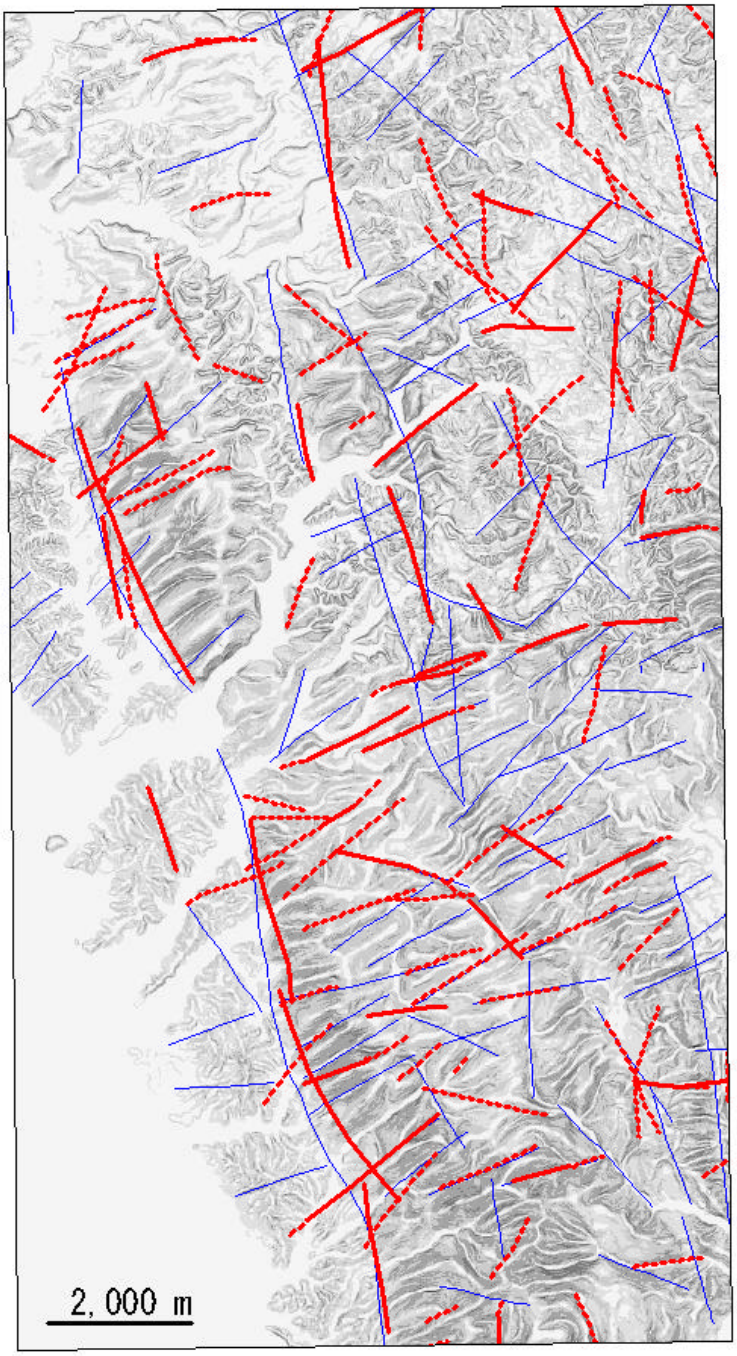


図 4.4　ケース A3,A6,B3 で計算されたリニアメント傾斜のシュミットネット
合計リニアメント数=410　傾斜が計算されたリニアメント数=92



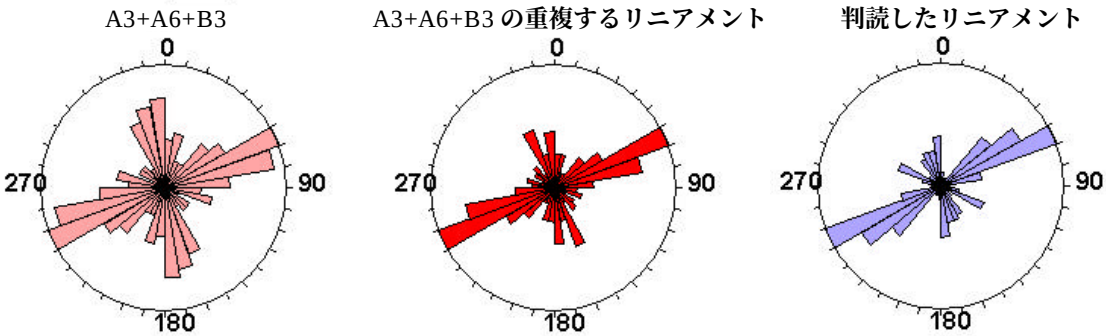


図 4.5　A3,A6,B3 の重複するリニアメント
赤実線 3 つが重複　赤点線 :2つが重複　青線 :判読されたリニアメント

4.9　抽出されたリニアメントと既存文献との対比

図 4.6 には地質図の断層（JNC TJ1400 98-001）と判読されたリニアメント（北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査 PNC TJ1361 94-001）とを比較した。地質図

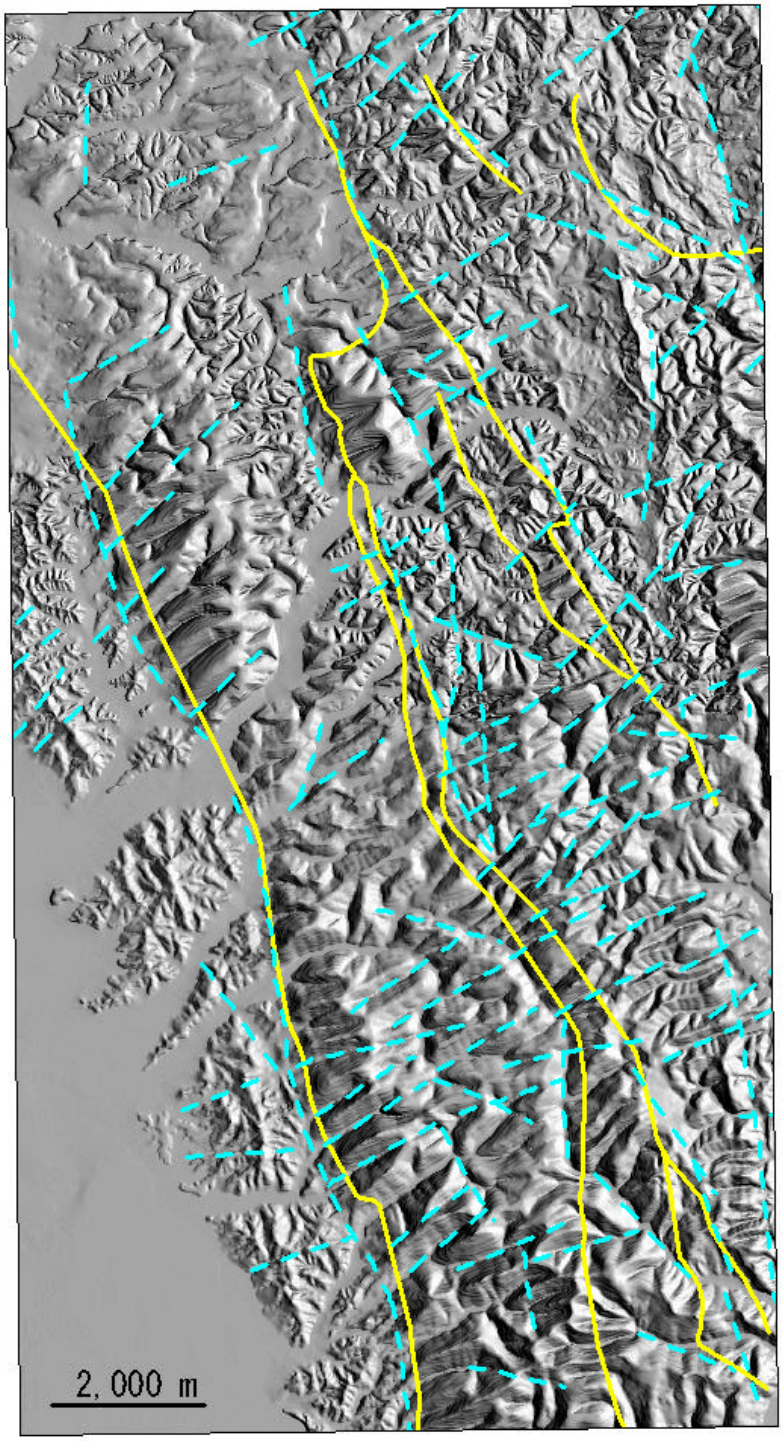


図 4.6　地質図の断層と判読されたリニアメント
黄色：断層（JNC TJ1400 98-001）
水色破線：判読されたリニアメント（北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査）

に記載されている断層は平行する 3 つの断層からなり，対象地域西側の大曲断層，東側の幌延断層，および両者に挟まれた断層がある。このうち山地/平野境界をなす大曲断層付近には，これに相当するリニアメントが判読されている。また，地域北部の幌延断層には直線的な境界によって丘陵と山地とが画されていることから，これに相当するリニアメントが判読されている。これに対し，中～南部の幌延断層および幌延・大曲断層に挟まれる断層については断層を示唆する地形特徴がほぼ認められないことから，これに相当するリニアメントは判読されていない。また，地域に卓越する ENE-WSW 系リニアメントについても，これに相当する断層は地質図に記載されていない。

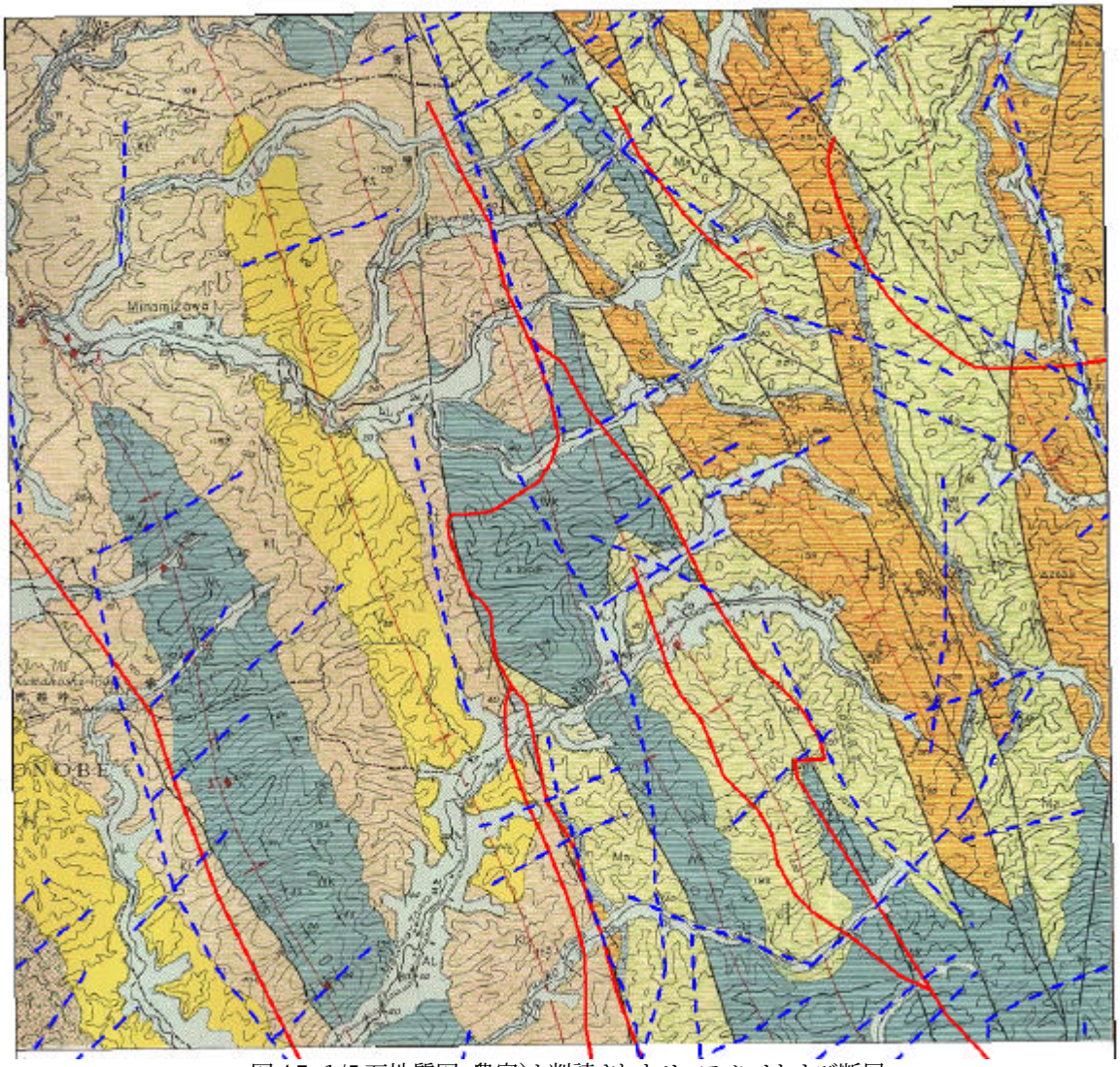


図 4.7　1/5 万地質図（豊富）と判読されたリニアメントおよび断層
赤：断層（JNC TJ1400 98-001）
青破線：判読されたリニアメント（北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査）

図 4.7 には地質調査所による縮尺 1/5 万地質図「豊富」を背景とし，これに断層（JNC TJ1400 98-001）と判読されたリニアメント（北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査）を表した。縮尺 1/5 万地質図は昭和 35 年発行であり，現在の地質図(JNC

TJ1400 98-001）とは，かなり違っている部分がある。ただし，大曲，幌延断層，および両者に挟まれた断層は，位置に若干の違いはあるものの，基本的な構造は変化していない。したがって，この縮尺 1/5 万地質図幅の断層と判読されたリニアメントとを比較しても，やはり図 4.6 と同様に一致しない点が多い。

以上のように，大曲断層の東方に位置する断層については，リニアメントとして判別する地形特徴がほぼ現れないことから，断層に相当するリニアメントは判読されていない。同様に地形特報から自動抽出されるリニアメントについても，これらに相当するリニアメントは抽出されていない。

図 4.8 では地質図(JNC TJ1400 98-001）と判読されたリニアメント（北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査）および，自動抽出したリニアメントを比較した。なお，自動抽出したリニアメントは図 4.5 で示したケース A3，A6 および B3 の抽出結果の内，2 つ以上が重複するリニアメントを示した。また，この自動抽出されたリニアメントと判読されたリニアメントの方位特性も合わせて示した。

既に述べたように，A3,A6 および B3 の自動抽出したリニアメントのうち重複するリニアメントの方位特性は，判読されたリニアメントの方位特性とかなり類似した特徴を示していることがわかる。したがって，DEM から算出した地形特徴を利用することで，リニアメント判読と類似した構造特性の解析が実施できるものと考えられる。

図 4.4 で示したように傾斜が推定できたリニアメントは ENE-WSW 系のリニアメントに多く，これはこの方向のリニアメントが多いことを反映する。これら ENE－WSW 系リニアメントの傾斜方向は明瞭な偏在性が認められず，線素のふらつきから偶然算出された可能性がある。NNW-SSE 系リニアメントについてみると，大曲断層の西側の丘陵地では西傾斜が多く，逆に東側では東傾斜のリニアメントが多くなる傾向を示している。

図 4.9～4.11 には，判読されたリニアメント，ケース A3,A6,B3 の 3 ケースを合わせたリニアメント，A3,A6,B3 の 3 ケースで重複するリニアメントについて全方位および 8 方位の線密度(km/km^2)を表した。3 つのケースで類似する点としては，大曲断層に相当する位置，地域中～南部，および北東部でリニアメント密度が高くなることがある。方位別で見ると，NE-SW～ENE-WSW のリニアメントは対象地域中～南部の大曲断層東方で高く，北部の大曲断層東方域ではやや低いことが特徴である。N-S～NNW-SSE 系リニアメントでは，大曲断層とこの東側に平行する 2 本の，計 3 本に相当する地域でリニアメント密度が高くなっている。ただし，重複するリニアメントで算出した図 4.11 ではリニアメント数が少なくなることから，この傾向は明瞭ではない。

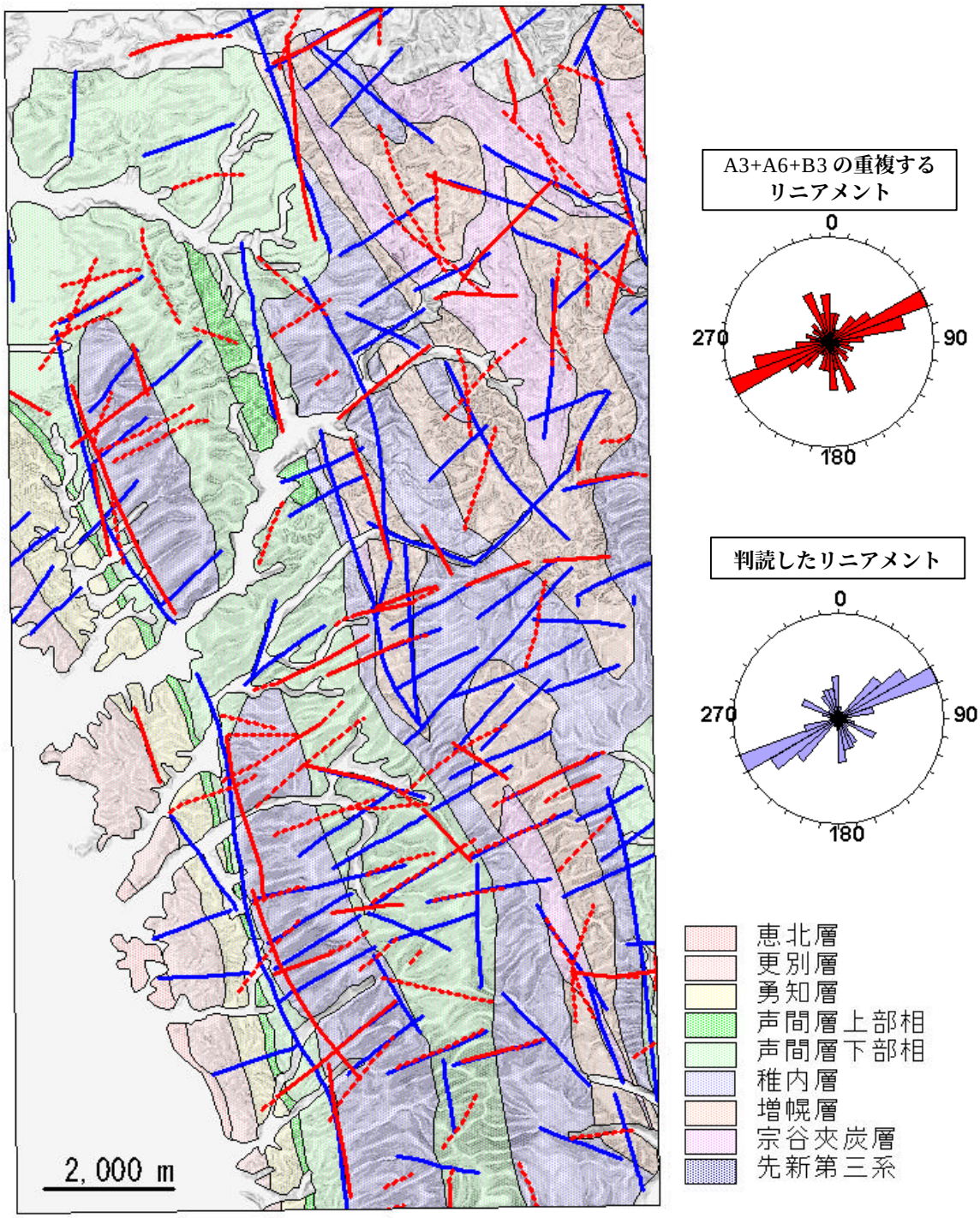


図 4.8　自動抽出したリニアメント, 判読されたリニアメントおよび断層の比較
赤 :A3,A6,B3 の重複するリニアメント
実線 3 つが重複　破線 :2つが重複赤
青実線 :判読されたリニアメント (北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査)

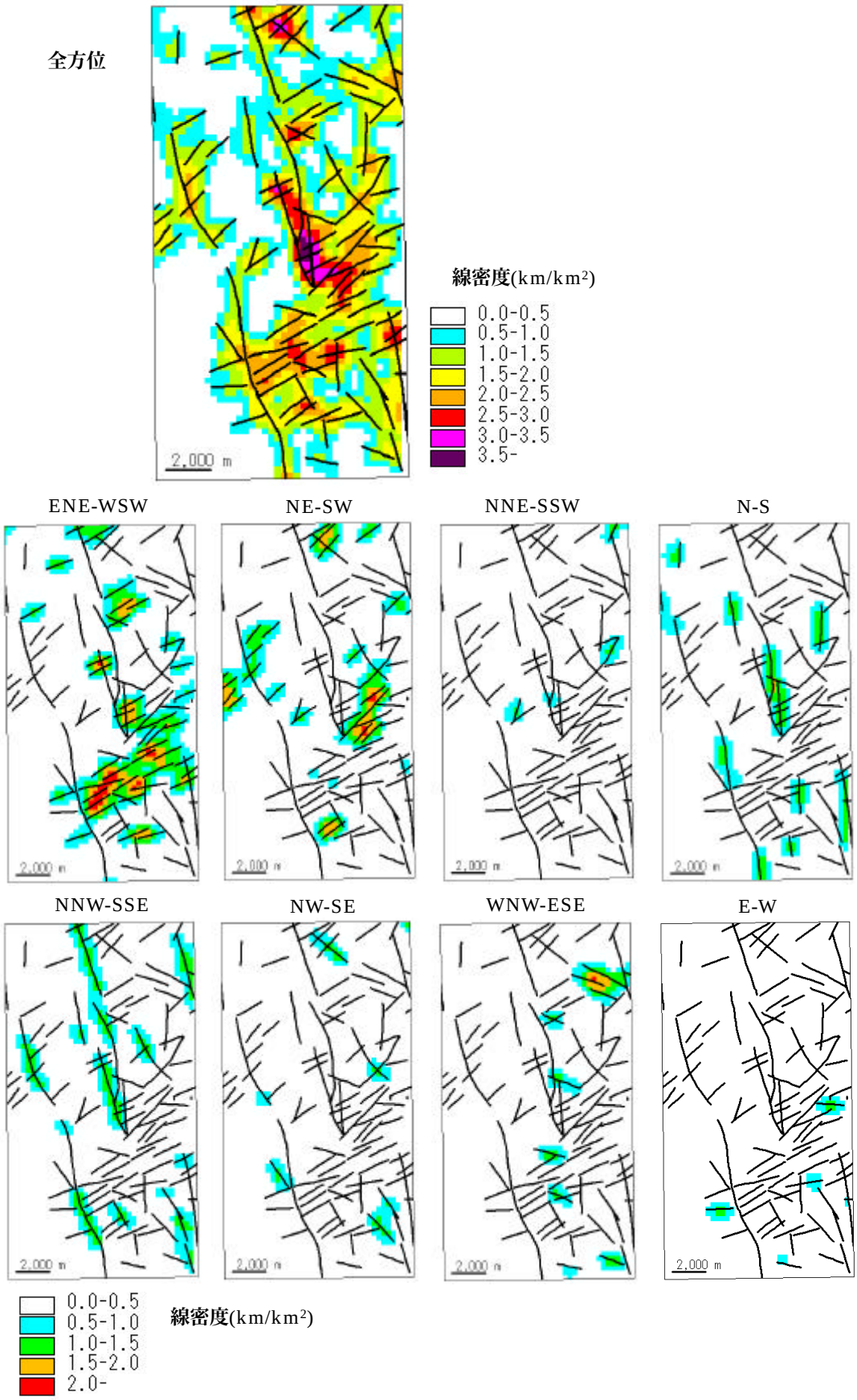


図 4.9 判読されたリニアメントの密度(全方位と方位別)

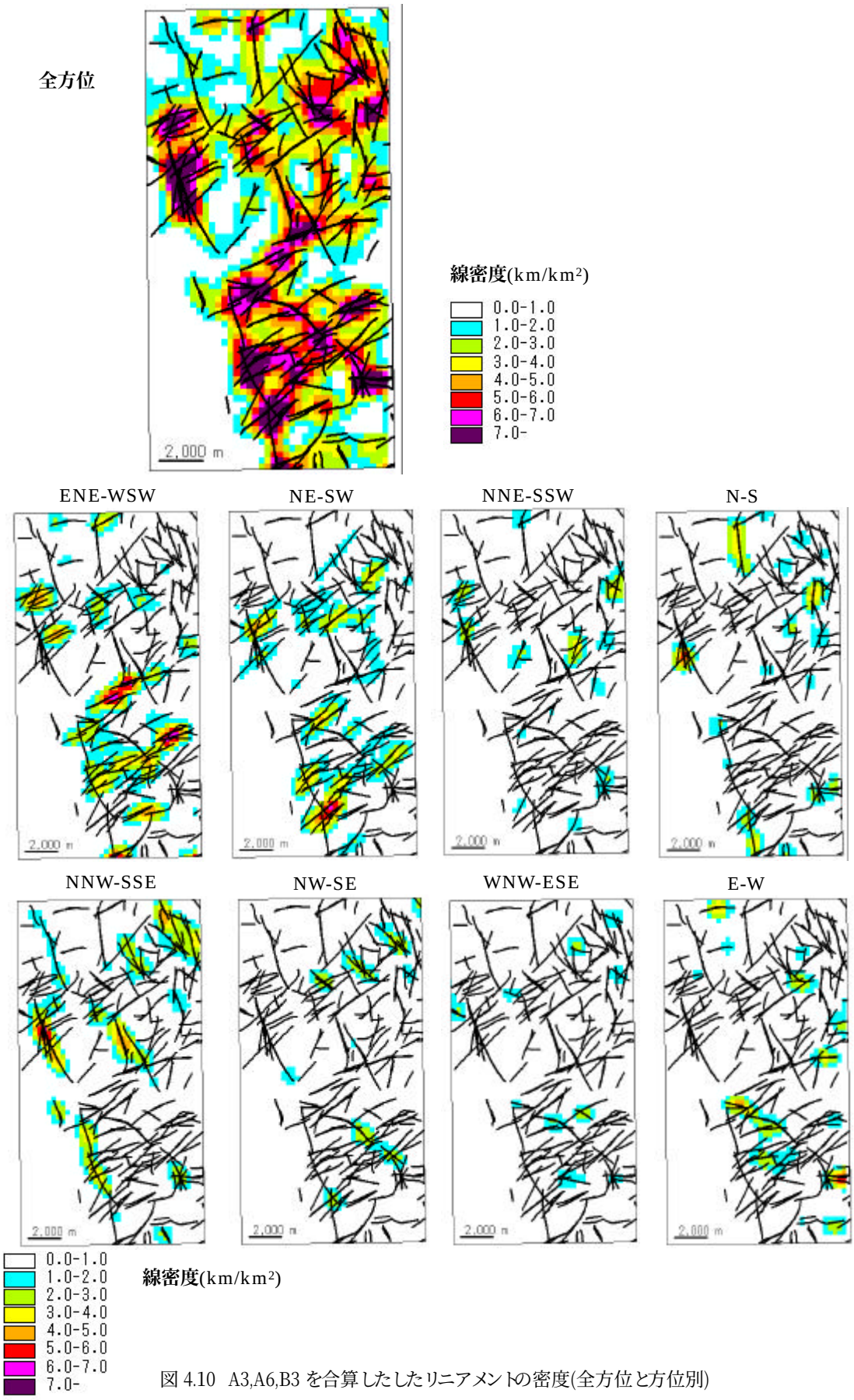


図 4.10　A3,A6,B3 を合算したしたリニアメントの密度(全方位と方位別)

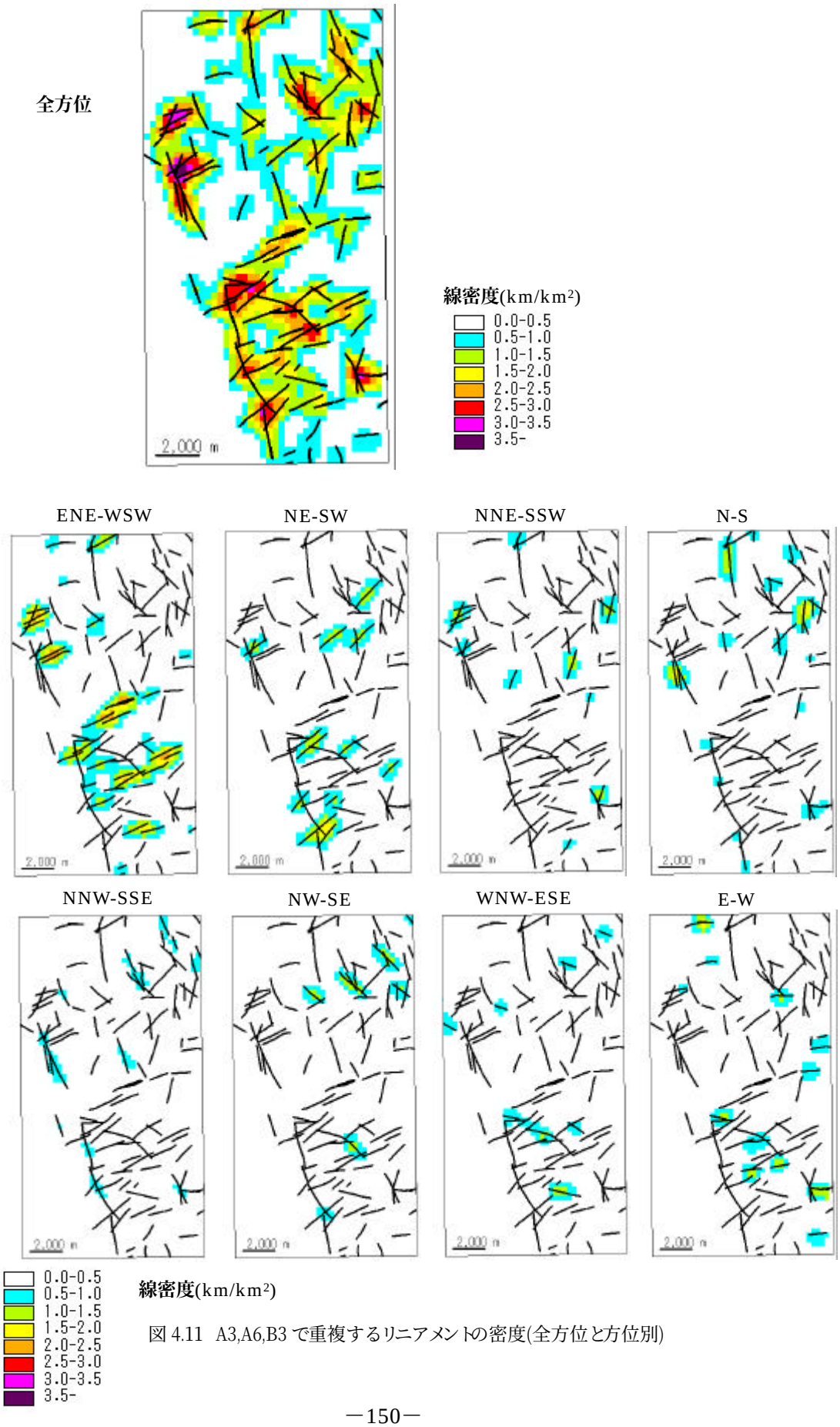


図 4.11　A3,A6,B3 で重複するリニアメントの密度(全方位と方位別)

4.10　対象地域北西部のリニアメント特性

対象地域北西部は北進地区と呼ばれる地域の東半分を含む。ここでは対象地域北西部についてその地形・水系の特徴および推定されたリニアメントの特徴を述べる。なお、以降では対象地域北西部を「北進地区」と呼ぶ。また「北進」と呼ぶ場合は，図 4.12 に示した地名付近を指すものとする

(1)地形・水系密度と地質

図 4.12 は北進地区の陰影図であり，地形の肌理(水系の相対的な間隔，また，水系が作る谷の深さなどによって形成される地形特徴)，特に水系密度に注目して分類するとこの地域は NNW-SSE 方向に平行する 5 列の領域に分類できる(図中の H,L　H は高密度域，L は低密度域を表す)。大曲断層西方は丘陵からなり，NW-SE および NE-SW 方向の水系が発達し，その分布密度は高い(図 4.13)。この範囲では，更別・勇知層が主として分布する(図 4.14)。この大曲断層の東側は NE-SW 方向の流路が発達する河川密度の低い地域となっており，大曲断層付近が水系密度の変化する境界をなしている。この大曲断層の東側の低水系密度域は稚内・声問層下部の分布域に相当し，北進付近へ連続する背斜軸に沿った分布をなしている。

大曲断層東側に分布する低水系密度域の東側には，上幌延から北進東部に至る幅 1.0～1.5km 程度の水系密度の高い地形が連続する。この地域は声問層上部および下部の分布域に相当し，向斜軸に沿った分布をなしている。この水系密度の高い地域は，NE-SW と NW-SE 方向の水系が発達することが特徴であり，肌理が粗く水系の発達が悪い西側の低水系密度域とは水系密度に明瞭な違いが認められる。この高水系密度域の分布は，図 4.14 に示した地質の分布と整合していない。上幌延の北側に分布する声問層上部は，図 4.14 では分布幅が狭く，また，北進に至る河川(南沢)の南側のみに分布する。地形特徴の連続性から見れば，水系の高密度域は南沢およびこの北側の河川(北沢)以北まで水系の高密度域は伸びており，図 4.15 に示した縮尺 1/5 万の地質図幅「豊富」の勇知層(Yt，泥岩)の分布域に近い分布を示している。なお、前述した大曲断層東側の水系密度の低い地域は，図 4.15 では稚内層(Wk，硬質頁岩および泥岩)と声問層(Kt，泥岩およびシルト)の分布域に概ね一致している。したがって，地形特徴から見れば図 4.14 の声問層下部の上位(向斜軸沿いの地域)は声問層上部と類似した岩相(浸食特徴)をなしており，大曲断層西側の丘陵部に分布する勇知層に近い地形特徴を有している。

この水系密度が比較的高い地域の東側には，再び低水系密度域が帯状に分布し，この地域では NE-SW 方向の水系が発達する。この低水系密度域の東側境界の一部は幌延断層(地域北部)に相当する。なお，この低水系密度域は図 4.14 の稚内層および声問層下部の分布域に相当し，図 4.15 ではこの地域は稚内層および声問層の分布域に相当する。

幌延断層付近を境界とする低水系密度地域の東側には，NW-SE，NE-SW 方向の水系が発達する水系密度の高い地域が分布する。この地域は主として増幌層および宗谷夾炭層の

分布域に相当する(図 4.14)。なお，当地域は図 4.15 の「豊富図幅」でも増幌層(Ma,砂岩・泥岩・シルトおよび礫岩)および宗谷夾炭層(Sc，石炭・砂岩および頁岩)とされている。

以上のように，北進地区の地形および水系密度の特徴は，断層およびこれと平行する褶曲構造によって繰り返し現れる地表地質を反映している。これら地形特徴と図 4.14 で示した地質図との相違点は，上幌延から北進の東部に至る水系密度の高い地域の分布形状にあり，地形特徴からみれば声問層上部は図 4.14 よりも幅広く，かつ，北側に延長できる可能性があると言える。また，声問層上部の地形・浸食形態はこの上位の勇知層と類似し，声問層下部はこの下位の稚内層に類似している。

(2)判読されたリニアメントの分布特性

北進地区のリニアメント自動抽出結果を図 4.16 に示した。利用したリニアメント自動抽出結果は，図 4.4 で示した A3,A6 および B3 を合わせた結果(黄色破線)，図 4.5 で示した A3,A6 および B3 のうち 2 つ以上が重複するリニアメント(赤実線)を示した。これら推定されたリニアメントのうち傾斜が算出されたリニアメントについて，矢印の方向で傾斜方向を，矢印の色の違いで推定された傾斜角の違いを示した。また，判読されたリニアメント(北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査　PNC TJ1361 94-001)の，①活断層に相当するリニアメント，および，②地質断層に相当するリニアメントを黒の実線で，③地形特徴によるリニアメントを青の破線で示した。さらに，幌延地域の地質図(JNC TJ1400 98-001)に記載されている断層を水色実線で示した。

ここでは，地質図の断層と判読されたリニアメントの共通点，相違点について述べる。地質図の断層は，大曲断層およびこの東側に位置する幌延断層があり，幌延断層は北進地区中東部付近で数条に分岐する。これらはいずれも NW-SE から NNW-SSE 走向であり，これに斜交あるいは直交する断層は記載されていない。判読されたリニアメント(PNC TJ1361 94-001)のうち黒実線で示した①と②は，主として NNW-SSE 走向を示し，このうち大曲断層と幌延断層の北部については，断層に相当する位置にリニアメントが判読されている。また，上幌延の南南東には，分岐した幌延断層に相当する位置にリニアメントが判読されている。前 2 者は，山地と丘陵を画する位置に相当し，後者は傾斜変換線の連続性から判読されたものと推定される。これ以外には，上幌延の北側に NNW-SSE 系のリニアメントが判読されており，このリニアメントは NNW-SSE 方向の河川の直線性から判読されたと考えられる。また，上幌延の東部に判読されたリニアメントは，鞍部と直線的な河川の連続性から判読されたと推定される。なお，これら 2 本のリニアメントは図 4.14 に示した地質図の断層や地層境界とは一致していない。

これ以外に判読されたリニアメント①および②として，北進地区の北東方に 2 本が判読されており，NE-SW および NW-SE の走向を持つ。このうち NE-SW 走向のリニアメントは河川の直線性から，NW-SE 走向のリニアメントについては陰影図では明瞭ではないが，おそらくは傾斜の変換線などから判読されたものと推定される。

判読されたリニアメントには，その他の地形特徴から判読されたリニアメント(③に相当)があり，図 4.16 には青の破線で示した。これらのリニアメントの特徴としては NE-SW～ENE-WSW 方向のリニアメントが卓越することにあり，これ以外の方向としては北進の北部および西部の N-S 方向の 2 条，および，上幌延北東および南東の NW-SE の 2 条がある程度である。これら卓越する NE-SW～ENE-WSW 方向のリニアメントの分布域は，(a)大曲断層西方の丘陵部，(b)大曲断層の東部および(c)幌延断層の東部に多く，上幌延から北進東部に至る地域(前述の水系密度の高い地域に相当)では，判読されたリニアメントは少ない。

(b)の大曲断層東部(主として稚内層，声問層下部の分布域)では，河川の直線性に注目したと推定されるリニアメントが多いが，リニアメントの推定されていない直線的な流路もあり，リニアメント採否の差を陰影図から識別することはできない。これは判読基準となった地形特徴が DEM の陰影図では表現できていないことが原因である可能性もある。

(b)の大曲断層東部に分布する NE-SW～ENE-WSW 方向のリニアメントは，比較的明瞭な地形特徴を持っている。これに対し，(a)の大曲断層西方の丘陵部に判読されたリニアメントは，判読の基準となる地形特徴を陰影図から読みとることはできない。おそらくは空中写真から判読されるわずかな地形特徴を追跡した結果，これらリニアメントが判読されたものであろう。この地域の地質は更別層，勇知層および声問層上部などの砂岩・泥岩を主とする地質からなり，大曲断層東側に分布する稚内層の硬質頁岩とは岩相が異なる。したがって，リニアメント判読ではその地域に分布する地質の違いを考慮した上で，地形特徴を読みとる際の判読基準を変更し，リニアメント判読を行っているものと考えられる。

(c)の幌延断層東部については，河川の直線性および傾斜の変換線の連続性から判読されたと思われるリニアメントが多い。この地域と前述した(b)の大曲断層東部の両地域で判読された NE-SW～ENE-WSW 方向のリニアメントは概ね等しい間隔で分布しており，600～800m 間隔で雁行状に配列することが特徴の１つとなっている。これに対し，(a)の地域では，雁行状に配列するリニアメントの間隔は 400m 前後を示し，(b)および(c)地域よりも高いリニアメント密度を持つ。

判読されたリニアメントの密度分布図を図 4.17 に示した。全方位のリニアメント密度分布図では，大曲断層の東西および幌延断層付近でリニアメント密度が高く，上幌延北西～北進地域でリニアメント密度が低くなっている。また，方位別密度分布図を見るとENE-WSW～NE-SW 方向では，大曲断層付近，および幌延断層東部でリニアメント密度がやや高くなっている。ただし，大曲断層東側の高密度域は北進には伸びておらず，また，この地域は全方位のリニアメント密度も低いことが特徴となっている。これ以外の特徴としては N-S から NNW-SSE 方向のリニアメントは大曲断層および幌延断層付近でリニアメント密度が高くなっていることがある。

(3)自動抽出されたリニアメントの分布特性

自動抽出されたリニアメント，地質図および断層を図 4.18 の左に，自動抽出されたリニ

アメント(以下，自動リニアメントと呼ぶ)と判読されたリニアメント(以下，判読リニアメントと呼ぶ)を図 4.18 の右に示した。ここでは，自動リニアメントと地質図の断層および判読リニアメントとの相違点について述べる。

地質図に記載されている断層のうち，大曲断層ではほぼその直上に自動リニアメントが山地/平野の直線状境界として抽出されている。これに対し幌延断層では，一致する自動リニアメントは抽出されていない。幌延断層の北部では断層と斜行するリニアメントが抽出されている。図 3.19 で示したようにこの位置には山地/平野(丘陵)境界として幌延断層上に 2 本の線素が認識されている。この 2 本の線素は雁行し，これらを連結したため，断層とやや斜行するリニアメントととして抽出されている。この境界線はオペレータサイズを変更した図 3.21 や図 3.22 では，ほぼ断層上に線素が認識されている。したがって，選択したオペレータサイズはこの地域に限ればやや不適切であったと言え，正確に幌延断層を追跡できなかった理由となっている。

また，幌延断層南側については，断層に相当する位置には自動リニアメントは認識されていない。これに対し一部ではあるが，これに相当する判読リニアメントが抽出されている。この原因は，地域中～南部での幌延断層が明瞭な地形特徴を示さないことが原因と考えられる。写真判読ではわずかな傾斜変換線や鞍部の情報から，南側の幌延断層に相当する位置にリニアメントを判読していると考えられる。これに対し自動抽出では線素を全領域で同じ基準から判別する。このため，わずかな地形特徴は線素として認識されない，あるいは，認識されても連結距離が離れておりスコアリング時にふるい落とされてしまうため，幌延断層の南部では自動リニアメントを抽出できなかったものと推定される。

今回の解析対象地域全域で自動抽出されたリニアメントは，ENE-WSW と NNW-SSE のほぼ直交する 2 つの方向のリニアメントが卓越することが特徴となっている(図 4.5)。この特徴は北進地区でも同様であり，図 4.18 左に示したように自動抽出では NE-SW～ENE-WSW と NNW-SSE の 2 方向のリニアメントが卓越する。

NNW-SSE 方向のリニアメントは大曲断層付近と幌延断層付近に多い。このほか両者の中間に位置する北進の東側に，連続する NNW-SSE 方向のリニアメントが抽出されている。このリニアメントは，図 4.13 の東西方向に水系密度が変化する境界付近の流路の連続性から抽出されたものである。このリニアメントの南側延長でも図 4.13 では同方向の流路が認められるが，これら流路間の間隔が広いこと，また，流路の谷形状が浅いことなどから，自動リニアメントは南側まで延長されていない。

前述したように幌延断層に相当する位置にはリニアメントは自動抽出されていないが、これからやや離れ、これと平行するリニアメントは 8 本程度抽出されている。これらは，図 4.13 の NNW-SSE 方向に連続する流路を連結することで抽出されたリニアメントである。北進の東側，および幌延断層付近に認められるこれら NNW-SSE 方向のリニアメントは，図 4.18 左に示したように，地質境界上やこれと平行するものが多い。したがってこれらリニアメントは，地質境界や地層境界上に形成された流路、つまり選択的な浸食による弱線

を検出したと考えられる。

図 4.18 右では，判読リニアメントと自動リニアメントとを比較した。自動リニアメントは NE-SW～ENE-WSW 方向が多く，この特徴は判読されたリニアメントと一致する。これは，判読したリニアメントの方位特性に一致させるように自動抽出するパラメータを決定したことによる。ただし，これら自動リニアメントと判読リニアメントとがほぼ正確な位置で一致するものは少ない。

自動抽出されたリニアメントの密度分布図を図 4.19 に示した。図 4.17 と図 4.19 の全方位リニアメント密度分布図を比較すると，両者に共通点があることが解る。共通する特徴は，①大曲断層およびこの東側でリニアメント密度が高い，②幌延断層の東側でリニアメント密度が高く，特に北部と南部で高い，③上幌延北西から北進付近の東部に掛けた向斜構造沿いではリニアメント密度が低い，④北進とこの東側でリニアメント密度が低い，⑤上幌延南西方から大曲断層までの地域ではリニアメント密度が低い，ことなどがある。

自動抽出では地形特徴から線素を抽出・連結するため，地形変化の小さい丘陵部では線素が抽出されにくく，リニアメントは認識されにくい。したがって，①，②および④の密度差は，地形の起伏形態の差を反映した可能性が高い。しかしながら③の上幌延北西域から北進の東側に掛けたリニアメント密度の低い地域では細かな沢が発達し，水系密度はむしろ高い地域であり，線素も多く認識されている地域である。また，④の上幌延南西から大曲断層までの地域は，図 4.12 の陰影図に示したように，稚内層および声問層下部が分布し，比較的急峻な地形を呈している。これらの地域は図 4.12 の陰影図で見る限り，リニアメント密度の高い大曲断層東側の地域と地形は類似している。したがって，リニアメントの密度差は必ずしも地形起伏だけを原因としているわけではない。

次に方位別の分布密度について判読結果との比較を行う。自動リニアメントの方位別分布は, ENE-WSW～NE-SW 方向では大曲断層東側で高く, この特徴は判読結果と類似する。また，幌延断層東側でもこれらの方向のリニアメント密度は高く，この両者に挟まれた上幌延北東部から北進の東側に連続する領域(向斜軸沿い)では，これらの方向のリニアメント密度は低くなっている。また，地域北部の北進や地域南部の上幌延南西方では，同系のリニアメント密度は低い。

N-S～NNW-SSE 方向については，大曲断層付近で自動抽出，判読リニアメントともにリニアメントの密度は高い。また，幌延断層沿いでもリニアメント密度の分布域には差が認められるものの，やや高いリニアメント密度を示している。

以上のようにリニアメントの位置そのものは異なるが，リニアメント方位の特性や密度分布を比較すると，方位別の分布密度などに共通する特徴が多く認められることがわかる。したがって，地形特徴から自動抽出したリニアメントは、判読結果とは同一ではないが、方位特性や密度分布などの地域特性を表すことができるものと考えられる。

(4)推定されたリニアメントの傾斜方向について

流路や傾斜変換線から認識された線素は連結され，篩い分けられることでリニアメントとして抽出される。この時，線素を構成する始点・終点および中間点では位置および標高値を得ることができる。リニアメントにほぼ直交する投影面を定義し，これら線素構成点の投影断面を作成すると，点群がある配列をなす場合がある(この時，投影断面の横軸は投影軸からの距離であり，縦軸は標高を表すものとする)。このような場合，推定されたリニアメントは位置する場所の標高を反映して屈曲していると考える。無論，流路の振れによって見かけ上傾斜が算出される場合もあるが，これらリニアメントから推定された傾斜方向が一定方向を示し，偏在するならば，断裂系の傾斜を示唆する可能性がある。

ケース A3，A6 および B3 でそれぞれ計算された傾斜方向は少ないため，図 4.20 には 3 つのケースを合わせ，推定された傾斜方向を矢印で，また，推定された傾斜角を色で表した。これら推定されたリニアメントの傾斜方向および傾斜角は，次の特徴を持つ。

①NE-SW～ENE-WSW 方向のリニアメントでは，8 本が北傾斜，2 本が南傾斜を示し，北傾斜を示すリニアメントが多い。

②これら北傾斜を示す NE-SW～ENE-WSW 方向のリニアメントは大曲断層東側に分布する稚内層および声問層下部に多く認められ，この地域での推定された南傾斜は 1 本のみである。

③N-S～NW-SE 方向のリニアメントのうち 5 本の傾斜を推定できたが，西傾斜 3 本，東傾斜 2 本と明瞭な偏りや偏在性を示していない。また，大曲断層に相当するリニアメントでは傾斜は推定されていない。

以上から，大曲断層東側に分布する稚内層および声問層下部では NE-SW～ENE-WSW 方向のリニアメントが発達し，その多くは北傾斜を示す結果となった。なお，これは北進地区全体の特徴でもある。ただし，急傾斜が推定されたリニアメントは、DEM の空間分解能の点からその信頼性が極めて怪しい。なお，80 度以上の傾斜角が推定されたリニアメントを除外すると，全体では北傾斜 5 本，南傾斜 1 本となる。

(5)解析の問題点と必要な検証作業

ここでは北進地区から導かれた結論に対する問題点を述べる。1 つは利用した DEM の空間分解能と標高精度の問題である。本解析に使用した地形データは空間分解能 10m，標高値は 0.1m まで記述された DEM を利用している。一般に市販される空間分解能 50m の DEM(50m メッシュ数値地図「標高」)から作成した陰影図に比較すると，使用した 10m メッシュでは明らかに地形にメリハリが生まれ，地形特徴が明瞭となっている。ただし，この DEM は縮尺 1/25,000 の地形図の 10m 間隔で記述された等高線データから内挿されたデータである。したがって，縮尺 1/25,000 地形図と同等の標高精度しかなく，0.1m 単位の標高はあくまで内挿値でしかない。また，標高値の内挿には縮尺 1/25,000 地形図に記載され

ている補助線は利用されていない。

空中写真の立体視から判別される細かな地形は、縮尺 1/25,000 地形図の等高線には表現されない場合が多い。したがって、等高線から内挿された DEM にも細かな地形の凹凸は再現されていない。既に述べたように、自動リニアメントと判読リニアメントの位置は一致しないものが多い。この原因は，判読時に利用された地形特徴が DEM で利用できないことが原因の 1 つとして考えられる。

また，自動リニアメントについてその振れから傾斜を推定するが，標高値精度が縮尺 1/25,000 地形図と同等(主計曲線間隔の 1/2)とすれば，標高変化の小さなリニアメントで傾斜を推定することは極めて困難であると言える。

2 つ目の問題点として，内挿方法のアルゴリズムによる問題点がある。前述したように等高線間隔の狭い大曲断層東側の山地では，等高線に沿って緩急が繰り返す階段状の地形が現れている。これら階段状の地形は現実には現れていないと考えられ，等高線データからの標高内挿時に形成された偽地形特徴である。傾斜変換線は落水線方向に計測することから，急斜面から緩斜面に変化する階段状の地形は地形特徴を認識する上でノイズとなっている。今回の解析で抽出した傾斜変換線は，落水線方向のラプラシアンの標準偏差を計算し，+0.5σ以上を異常域として認識させている。したがって，これら階段状のノイズは、異常域と認識させる閾値を押し上げ，認識されるべき傾斜変換線を見落としている可能性が高い。

これら DEM の精度的な問題に関して言えば，空中写真から作成した大縮尺の地形図(縮尺 1/5,000～1/2,000 など)を利用すれば解決できるものと考える。ただし，既存の縮尺 1/25,000 地形図を単に拡大し，等高線を加筆したものであってはならない。また，近年利用されるレーザープロファイラを利用することも解決の 1 手法であるかも知れない。ただしリニアメントの自動抽出は地形変化を捉えることが目的であり，空間分解能を細かくすることによって，ラプラシアンなどのようにむしろ小領域での地形特徴量が不明瞭になるケースもある。したがって，認識する地形の規模を的確に設定することが重要である。これは精度の高い DEM から空間分解能を変更し，空間分解能を変更した DEM から自動抽出を行うことで，解決できる問題と考える。この場合，粗い空間分解能では断層などの大きな構造が，細かい空間分解能では節理や層理などの小さな構造が識別できる可能性もある。

3 つ目に，リニアメントの自動抽出プロセスにもいくつかの問題が含まれている。例えば，山地/平野境界の抽出は，論理的アルゴリズムとなっていない。これは地形規模によって視野(空間分解能)を変更する必要があるが、現状では地域の地形規模に応じて視点を変更させており、アルゴリズムの大幅な改変が必要と考えられる。また，流路や傾斜変換線の連結パラメータやスコアリング方法および重み付けについても，他地域とほぼ同じ値からなるパラメータに落ち着いたとはいえ，ケース数としてはまだ少ない。

今回の解析ではリニアメントを①流路の直線性，②傾斜変換線の連続性，③山地/平野境界の直線性に類型化し，地形特徴を線素として表現した。これ以外に，鞍部，河川の屈曲

に代表されるようなリニアメントの判読基準があり，これら地形特徴についても線素として認識させるアルゴリズムを開発する必要がある。

自動抽出・判読を含めてリニアメント解析結果と地下構造とが実際にどう結びつくのかについては、現在も明らかにされていない。自動抽出では図 3.37～3.43 に示したように獲得スコアによって抽出されるリニアメントの方位特性は明らかに変化し、低スコアのグループでの方位特性は，流路の方位特性とほぼ一致している。これは、スコアの低いグループは確率に従って連結されるものであることを意味し、高いスコアでは何らかの地形特徴の意味づけ(断層や地質境界など構造に起因する地形特徴)が付加されたことにより，方位特性が変化したものと考えられる。また、今回検討を行っていないが、DEM の空間分解能を変更しても抽出されるリニアメントの方位特性は変化するものと考えられる。この場合でも、解像度の粗い DEM では断層に相当するような主要な構造がリニアメントとして抽出され、細かい DEM では層理、節理情報などより細かな構造がリニアメントとして抽出される可能性が高い。

本作業では地形特徴からリニアメントの自動抽出を行い、連結パラメータの検討や篩い分けでの項目間の重み付けを検討した。本作業の特徴として、これらパラメータさえ決定すれば常に同じ結果が得られることがある。また、検討したパラメータにより抽出されたリニアメントは、判読されたリニアメントと一致しないものの、方位別の分布特性など判読結果とほぼ類似する結果が得られている。本手法では，抽出されたリニアメントをその地形特徴(凹型度、方向、長さ、線素構成比)や、リニアメントの確実度に相当するスコアから再分類することが可能である。これら分類結果と試錐データで得られた裂罅構造とを対比すれば、断層などの水理構造に重要な意味を持つリニアメントの地形特徴や、節理あるいは層理面などやや重要性の薄れる構造のリニアメントの地形特徴を明らかにできる可能性がある。また、本解析ではリニアメントの傾斜推定を行った。ただし本解析結果については検証しておらず、今後検証する必要がある。

リニアメント解析結果を定量的な解析結果とするためには、自動抽出を行った結果および推定した傾斜方向の結果と，試錐データから得られたフラクチャ解析結果とを合わせて考える必要がある。また，地表踏査によって試錐で推定されたフラクチャが地表に到達しているのか，地表踏査で明らかにされたフラクチャはリニアメントとして認識されているかなど，今後検証すべき事項は多い。

空間分解能を変更した自動抽出結果、リニアメントの地形特徴による再分類、およびリニアメントの確実度に相当するスコアによる再分類結果と，試錐データおよび地表踏査結果などを比較検討し、抽出されたリニアメントの特徴と地下構造とを結びつけることが本手法の将来的な目標である。

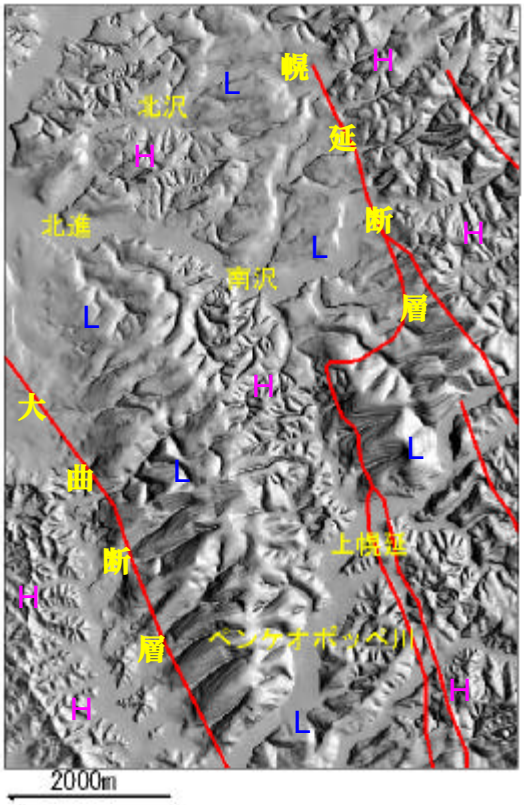


図 4.12　北進地域の陰影図

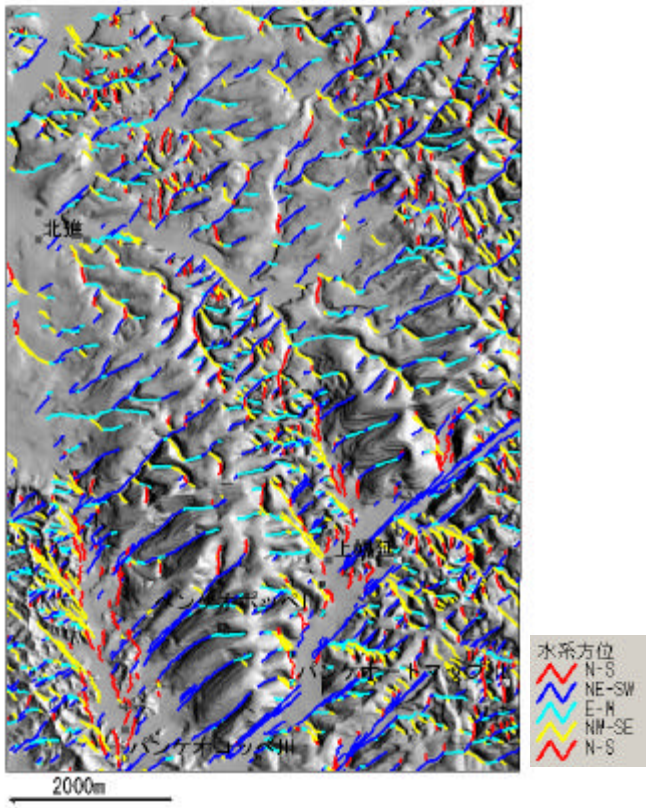


図 4.13 北進地域の水系図
(平坦部の流路を削除)
流路方位は 4 方位で分類

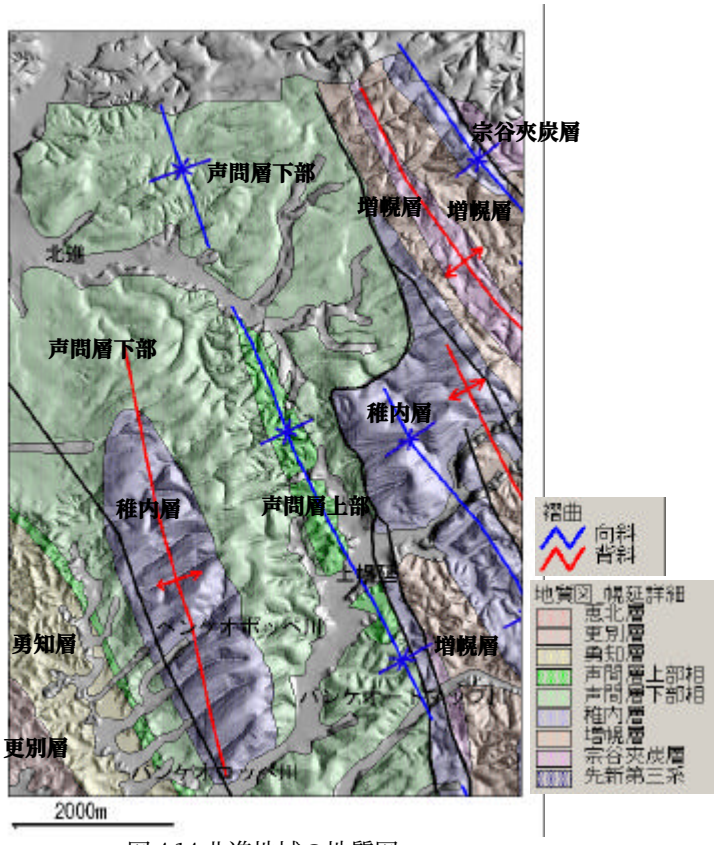


図 4.14 北進地域の地質図
(JNC TJ1400 98-001　を引用)

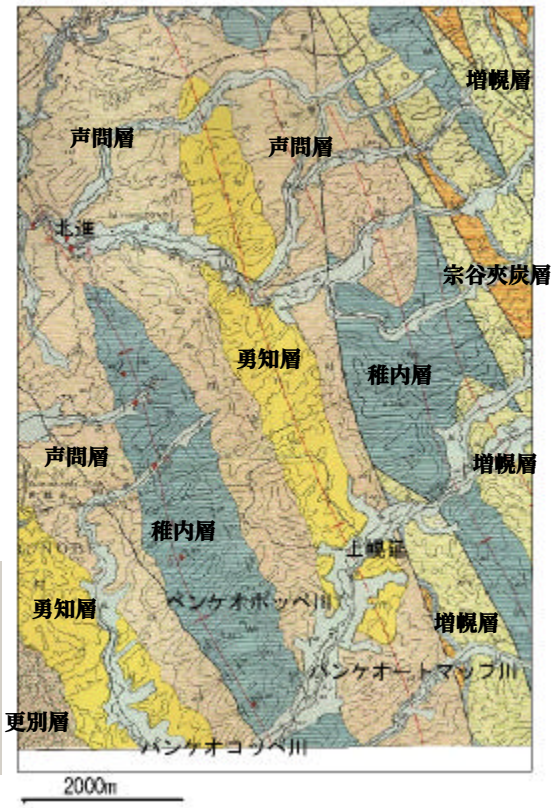


図 4.15 北進地域の地質図　豊富」
(縮尺1/5万，　豊富」図幅, 1968)

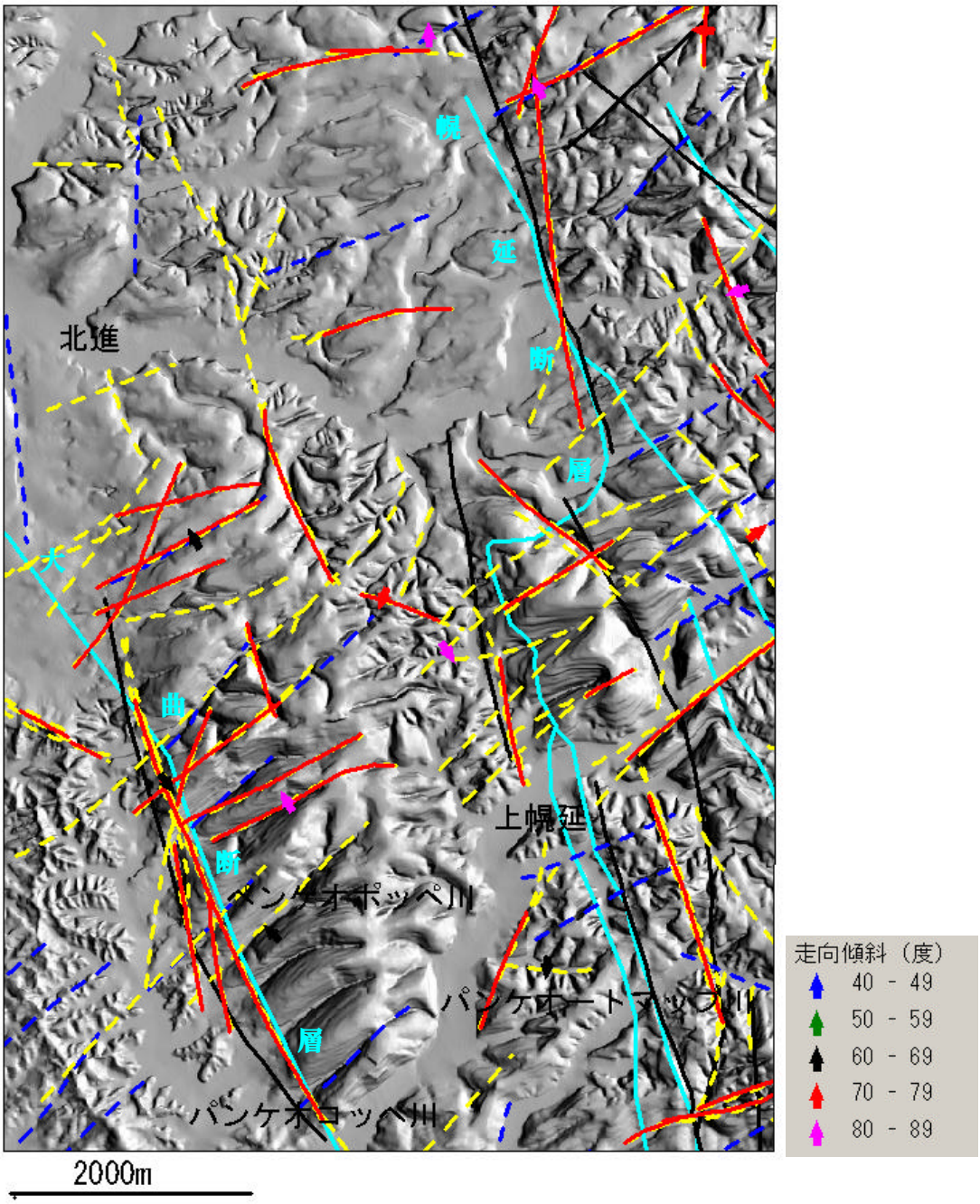
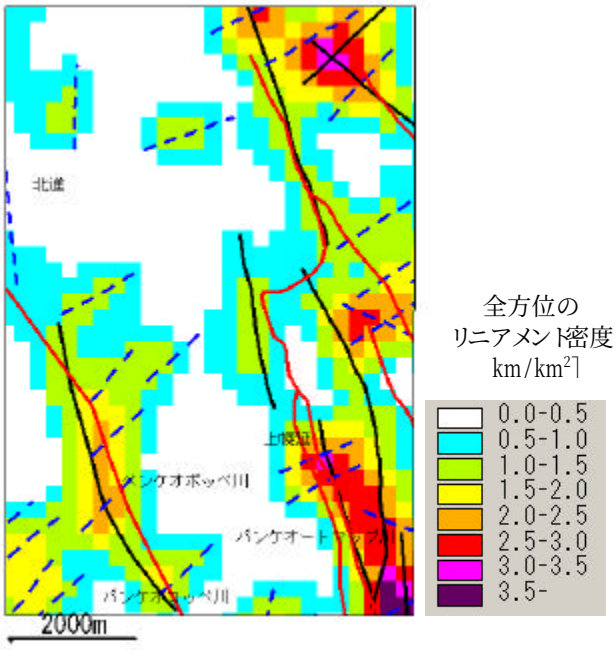
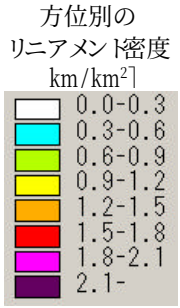


図 4.16 北進地域のリニアメント分布図と推定されたリニアメント傾斜

黄色破線 :推定されたリニアメント（A3,A6およびB3の結果を合わせたもの）
赤色実線 :推定されたリニアメント（A3,A6およびB3が重複・平行するもののみ）
矢印：A3,A6およびB3で傾斜が推定されたリニアメント, 向きは傾斜方向, 色は傾斜角を表す）
黒色実線 :判読されたリニアメント(PNC TJ1361 94-001)のうち①と②に分類されるリニアメント
青色破線 :判読されたリニアメント(PNC TJ1361 94-001)のうち③に分類されるリニアメント
水色実線 :地質図(JNC TJ1400 98-001)に示された断層

背景は陰影図





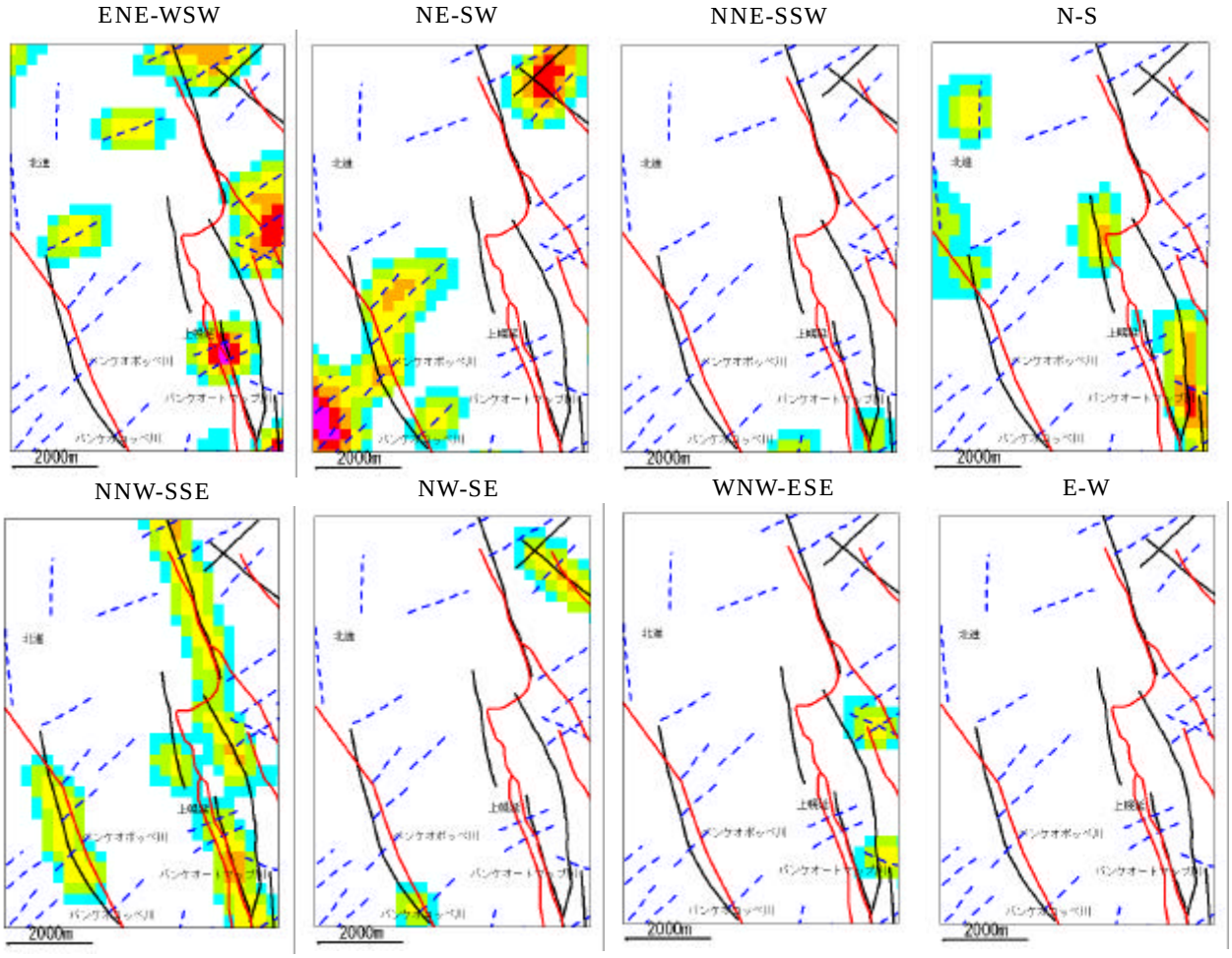


図 4.17 北進地域の判読されたリニアメントの密度分布図
黒線 :①活断層に相当するリニアメント, および, ②地質断層に相当するリニアメント
青破線 :③地形特徴によるリニアメント
赤線 :幌延地域の地質図(JNC TJ1400 98-001)に記載されている断層

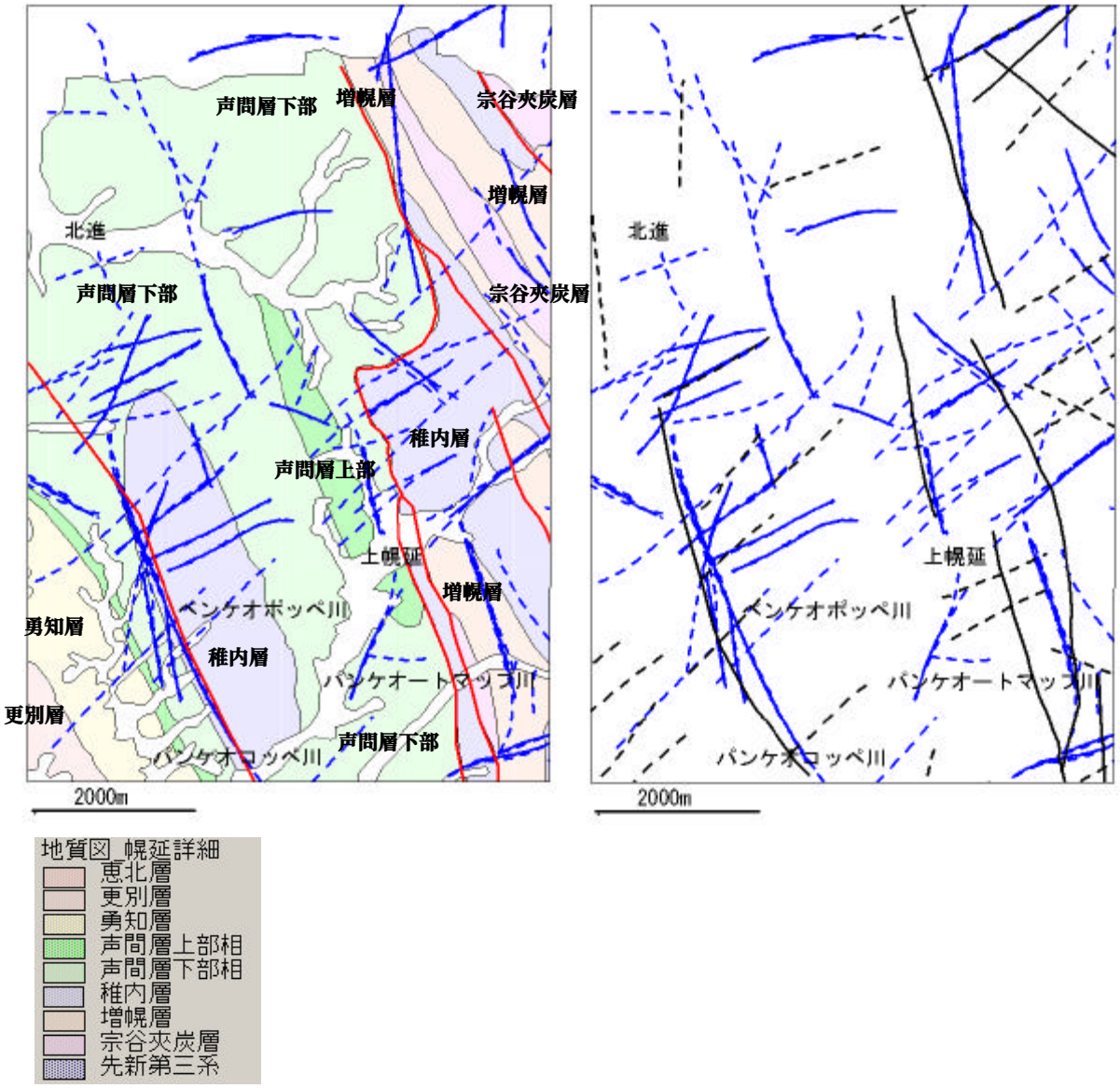


図 4.18 北進地域のリニアメント自動抽出結果と地質断層および判読されたリニアメントの比較

[左図] 自動抽出されたリニアメントと地質図との比較
青破線 :自動抽出されたリニアメント(A3,A6およびB3の結果を合わせた結果)
青実線 :自動抽出されたリニアメント(A3,A6およびB3が重複・平行するもののみ)
赤実線 :地質図(JNC TJ1400 98-001)の断層
背景は地質図(JNC TJ1400 98-001)
[右図] 自動抽出されたリニアメントと判読されたリニアメントとの比較
青破線 :自動抽出されたリニアメント(A3,A6およびB3の結果を合わせた結果)
青実線 :自動抽出されたリニアメント(A3,A6およびB3が重複・平行するもののみ)
黒色実線 :判読されたリニアメント(PNC TJ1361 94-001)のうち①と②に分類されるリニアメント
黒色破線 :判読されたリニアメント(PNC TJ1361 94-001)のうち③に分類されるリニアメント

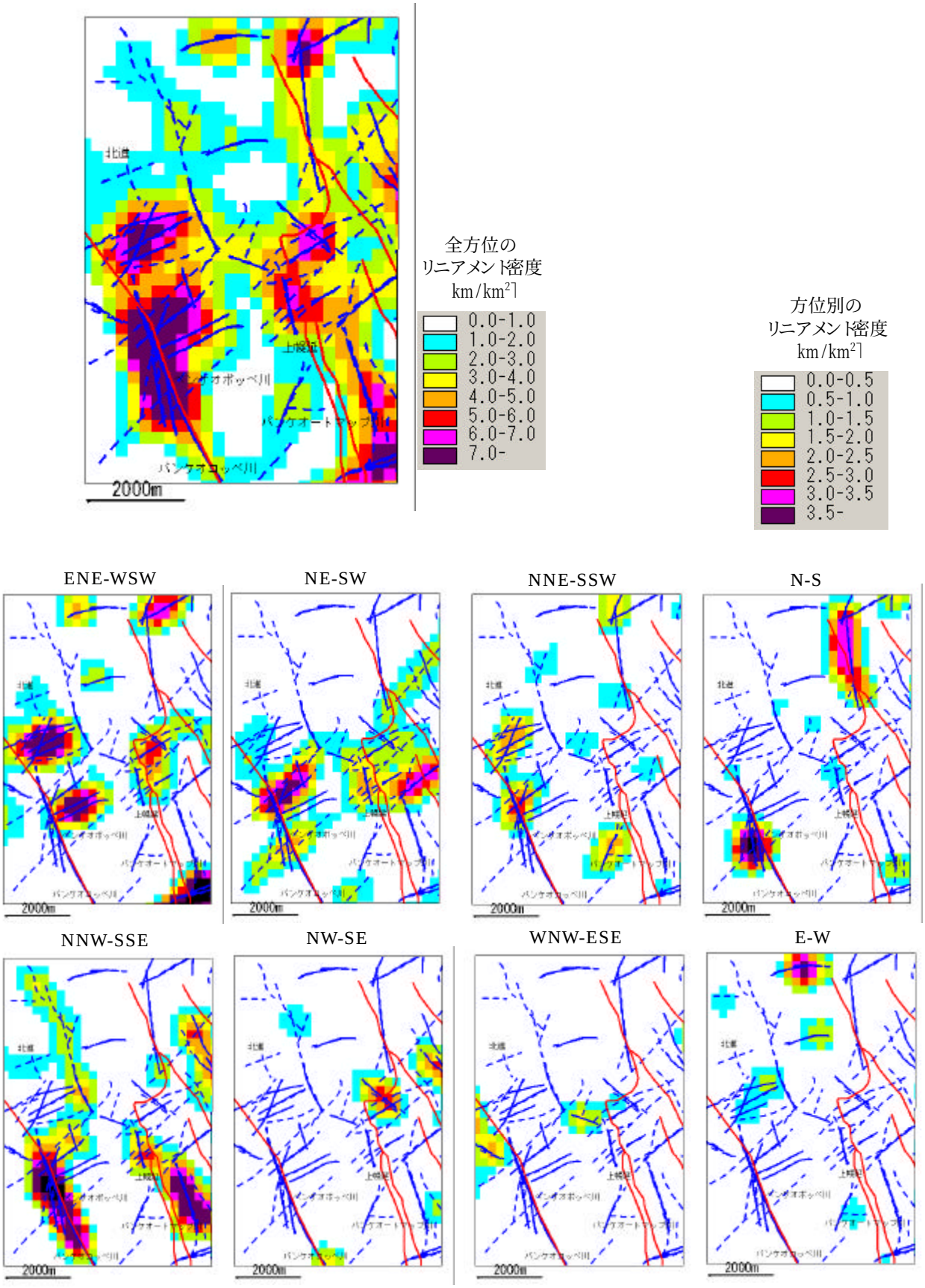


図 4.19 北進地域の自動抽出されたリニアメントの密度分布図
青破線 :A3,A6,B3 を合わせた自動抽出結果
青実線 :A3,A6,B3 の自動抽出結果で重複・平行するリニアメント
赤線 :幌延地域の地質図(JNC TJ1400 98-001)に記載されている断層

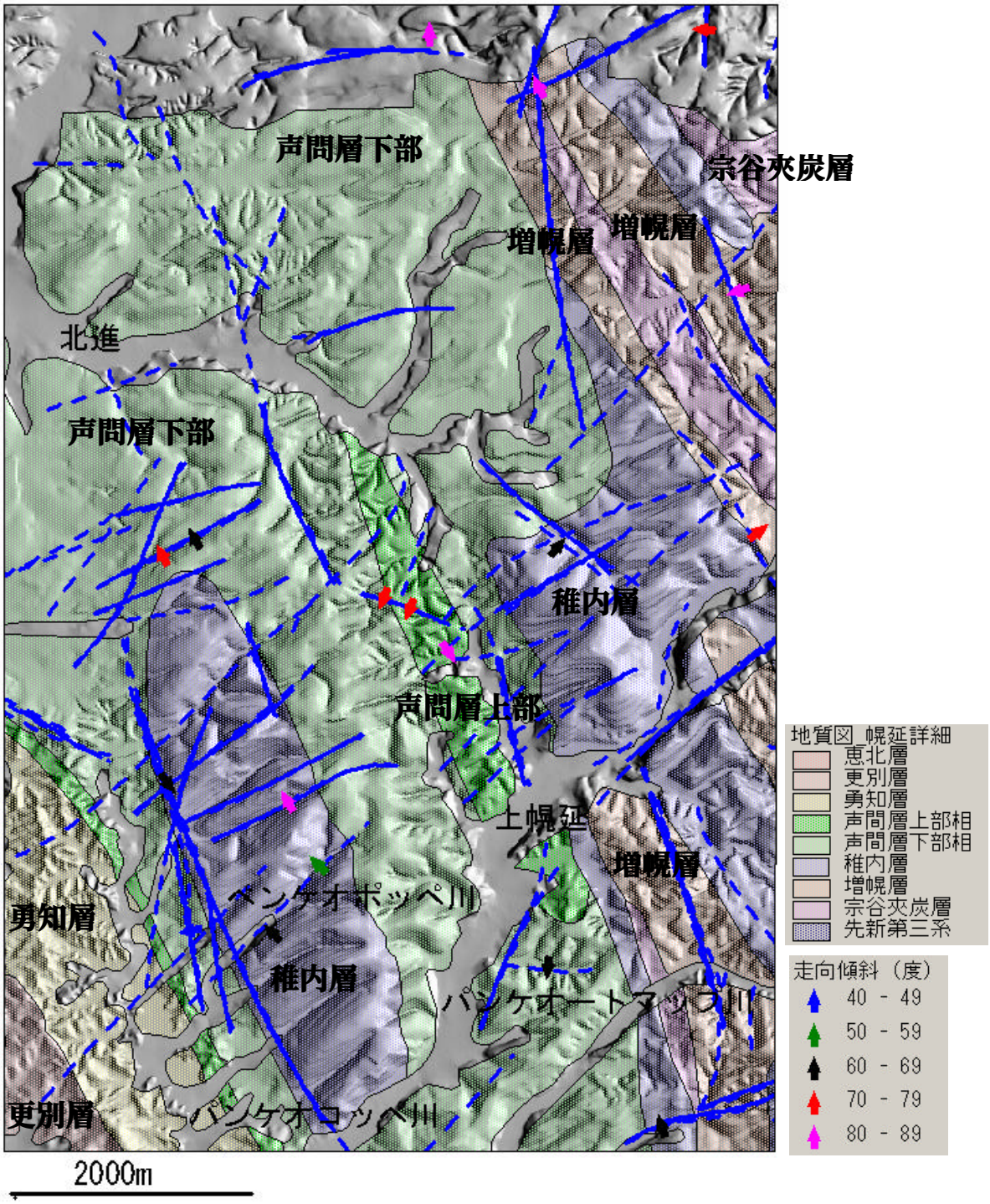


図 4.20 北進地域で自動抽出されたリニアメントの傾斜方向

青破線 :自動抽出されたリニアメント (A3,A6およびB3の結果を合わせた結果)
青実線 :自動抽出されたリニアメント (A3,A6およびB3が重複 -平行するもののみ)
矢印は推定されたリニアメントの傾斜方向を表し, 色はその傾斜角を表す
バックは地質図(JN TJ1400 98-001)

4.11　おわりに

幌延深地層研究計画における地質環境の長期安定性に関する研究として，幌延町を含む北海道北部の過去から現在までの地殻変動とそれに伴う地質環境の変遷や地震活動を明らかにするための調査を実施している。本件は，その一環として，幌延町を含む地域の断裂系を把握するためリニアメント調査を実施した。

本件で対象とした地域は地形図 1/25,000 の「本流」,「安牛」に相当する範囲とした。本件では，判読によって抽出されるリニアメントの地形特徴に注目し，DEM から地形特徴量を算出することでリニアメントを自動的に検出することを目的とした。本件で対象としたリニアメントとは，地形に現れる直線的な，あるいは緩やかにカーブした連続的な地形であり，地形的に現れた凹地あるいは凹地の配列として認識できるものを対象とした。これらは断層，破砕帯などの構造的特徴を反映する場合もあるが，偶発的な配列によって認識される場合もある。したがって，本件で抽出されるリニアメントは必ずしも判読によるリニアメントと一致するものではない。ただし，地形特徴から明確な定義で抽出されるものであることから，これら偶発的に現れるリニアメントは，一定の密度で現れ，方位特性をもたないものと推定される。したがって，地形特徴から抽出したリニアメントがある領域に，特定の方向性をもって集中する場合には，なんらかの構造的な支配を受けている可能性が高いと判断する。

本件によるリニアメント自動抽出は明確な定義づけによることが特徴であるが，地形特徴の認識や連結には検索距離や 1 つの線として認識させる際の振れ幅など，いくつかのパラメータを利用する。本件ではこれらパラメータを変更し，判読結果に近い結果からパラメータを決定した。

これらパラメータを利用すると，自動抽出されるリニアメントの方位特性は判読されたリニアメントの方位特性にかなり近いものとなる。ただし，個々のリニアメントの位置そのものは相違が認められる。今回の検討では，縮尺 1/25,000 地形図の 2 図幅に相当する比較的狭い範囲からパラメータを決定している。対象範囲を拡大した場合にもこれらパラメータがそのまま利用できるかは明らかとなっておらず，今後の検討が必要である。

今後，対象範囲を拡大してパラメータの検討を行い，決定されるパラメータが今回の結果とほぼ一致するならば，地形特徴からリニアメントを定義することが可能であることを示している。したがって，リニアメントを篩い分けるスコアの閾値なども定数化することが可能となり，明確な定義によって。リニアメントの評価を行うことができるものと考える。このことは，他地域との比較などにおいて，本解析手法がリニアメントの定量的な評価方法となることを意味するものである。

参考文献

J. Chorowitz, C. Ichoko, S. Riazano, and Y.J. Kim.: A combined algorithm for automated drainage network extraction, Water Resource Research, 28, pp.1293～1302, (1992)

K. Koike, S. Nagano, and O. Michito.: Lineament analysis of satellite images using a segment tracing algorithm, Computers & Geosciences, 21(9), pp.1091～1104, (1995)

Koike, K., Ichikawa, Y., Kouda, R. and Ueki, T.: Lineament Extraction from Several Kinds of Satellite Images and Azimuth at Distribution Analysis of Estimated Fractures for Southern Hyogo Earthquake Area, Proc. 4th Annual Conference of the Int. Assn. for Mathematical Geology, Ishcia, Italy, vol. 2, pp. 773～778. (1998)

Matheron, G.: "Principles of Geostatistics", Economic Geology, Vol. 58, pp 1246～1266. (1963)

S.Y. Lu and Y.C. Cheng.: An iterative approach to seismic skeletonization, Geophysics, 55(10), pp. 1312～1320, (1990)

Tsuneishi, Y.: Geologocal and experemental studies on mechanism of block faulting, Bull. Eaethq. Res. Inst., Vol.53, pp.173～242, (1978)

猪木　幸男，大沢　あつし，滝沢　文教：日本地質図大系，東北地方，朝倉書店，(1992)

大槻憲四郎，永広昌之：東北日本の大規模左横ずれ断層系と日本の地体構造の成り立ち，地質雑，Vol.98，57，pp.1017～1112，(1992)

活断層研究会：[新編] 日本の活断層，分布図と資料，東京大学出版会，(1991)

久保和也，柳沢幸夫，吉岡敏和，高橋　浩：浪江及び磐城富岡地域の地質，地質調査所，(1994)

小池一之，町田　洋編：日本の海成段丘アトラス，東京大学出版会，(2001)

須貝貫二，松井　寛，佐藤　茂，喜多河庸二，佐々木実，宮下美智夫，河内英幸：日本炭田図，常磐炭田地質図および説明書，地質調査所，(1957)

杉山雄一，粟田泰夫，秦　光男，衣笠善博：５０万分の１活構造図「旭川」，地質調査所，(1987)

地質調査所：縮尺 1/200,000 地質図 天塩,(1969)，枝幸,(1981)，羽幌,(1962)，名寄,(1969)

恒石幸正：阿武隈山地広野地域の地質構造，地質研究彙報，Vol.44，pp.749～764，(1966)

恒石幸正：4.断層，木村敏夫編，地質構造の科学，朝倉書店，pp.67～120，(1984)

動力炉・核燃料開発事業団：北海道北部における広域地質環境評価のための断裂系調査，PNC TJ1361 94-001，(1994)：

動力炉・核燃料開発事業団：北海道北部地域の地質に関する研究，PNC TJ1400 98-001，(1998)

動力炉・核燃料開発事業団：貯蔵工学センターに関する調査のとりまとめ，PNC TN1420 98-003，(1998)
野上道男：地形計測による 50m-DEM による地形計測値と地質の関係，地理学評論，72A，pp.23～29，(1999)
三田正一：常磐炭田双葉地区北部地質調査報告，地調報告，No.140，(1951)