



# 「長期的な大地の動きを探る」 ～隆起と沈降、堆積と侵食～

---

幡谷 竜太（はたや りゅうた）

一般財団法人 電力中央研究所

幌延フォーラム2017

平成29年11月10日、幌延深地層研究センター 国際交流施設

\* このスライドの著作権は電力中央研究所に帰属します

# 本日のテーマ 「地形・地質から大地の動きを探る」



# 本日のキーワード「段丘」

- ◆ かつての河床・浅海底～海浜など（もともと平坦な地形）が、隆起等の要因で持ち上がってできた地形を「段丘」と呼ぶ。「台地」という用語と同義に用いられることも多い。
- ◆ 段丘には様々な分類がある。
  - 成因からは、河成段丘、海成段丘などに分類される。
  - 分布位置により、河岸段丘(川沿い)、海岸段丘(海沿い)に分類される。河成・海成段丘と混同しやすいので注意。
- ◆ 段丘は、しばしば、隆起運動の痕跡である。



# 本日の話の流れ

## 1. 概論

## 2. 隆起と沈降

- 段丘の時空分布を調べる
- 電中研の隆起・沈降の研究
  - 時計を作る研究／段丘対比・編年の高度化時計の研究
  - 隆起量を測る研究／内陸部の隆起量の見積もりとその応用

## 3. 堆積と侵食

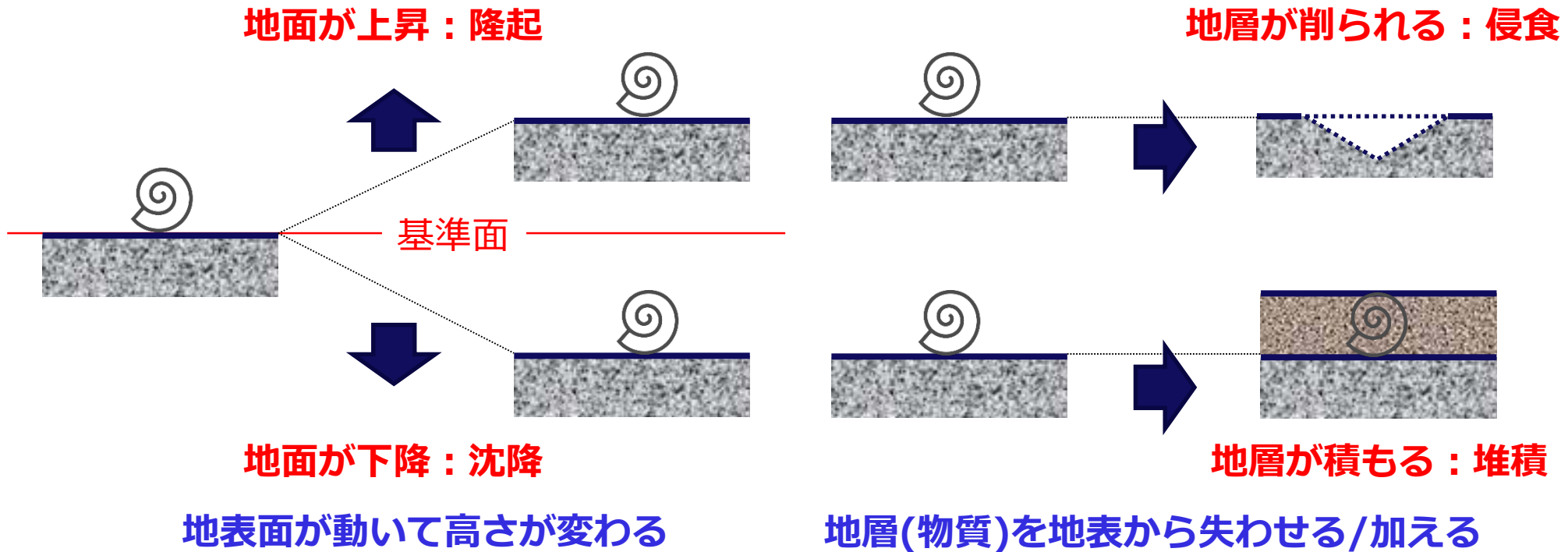
- 段丘に残された痕跡を調べる
- 電中研の侵食の研究
  - 削られてしまった地層の研究／現海岸線付近の下刻侵食量の評価

## 4. まとめ

## 5. 産業技術研究所、日本原子力研究開発機構との共同研究



# 隆起・沈降と堆積・侵食 ～地形学・地質学の基本～



注) 侵食や堆積で地表面の位置が上下することは、隆起・沈降とは言わない。

## ◆ 隆起・沈降と堆積・侵食の関係

- しばしば、**隆起**した地層は**侵食**される。
- しばしば、**沈降**した地層の上には新しい地層が**堆積**する。

# 隆起・沈降の調べ方

## ◆測地学的手法

- 現在目に見えているものを直接測る・観測する。
- 水準測量、GPS（全地球測位システム） など
- リアルタイム～100年の変化を捉える。

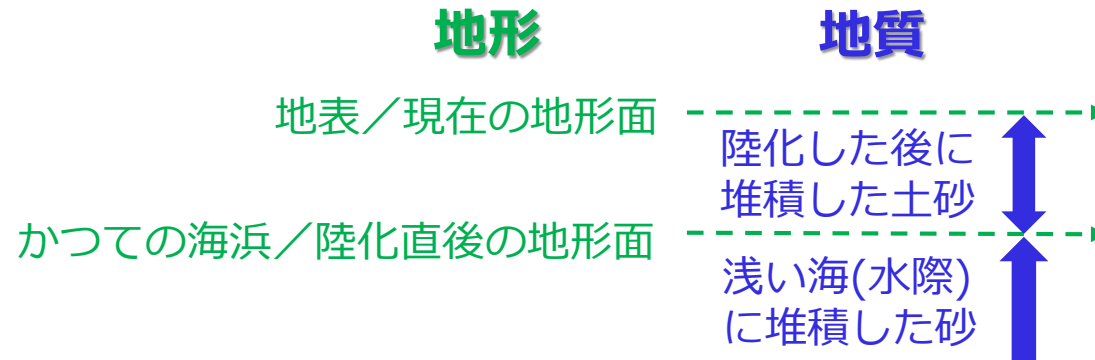
## ◆地形学的手法

- 元々いつどこでできたかが分かっている地形が今どこにあるかを調べる。
- 定性的には山の高さ（標高分布）も隆起・沈降の指標
- 数十万年前ぐらいからの期間の変化を捉える。

## ◆地質学的手法

- 元々いつどこでできたかが分かっている地層・岩石が今どこにあるかを調べる。
- 短期・長期の変化

# 地形・地質からの過去の隆起の痕跡を探す



## ◆ 地形学的な見積り

- 地形学的に、かつての海浜(海成段丘)の分布を探す。
- かつての海浜が今ある標高が隆起量(現地形面とほぼ等しいと見做すこともある)。

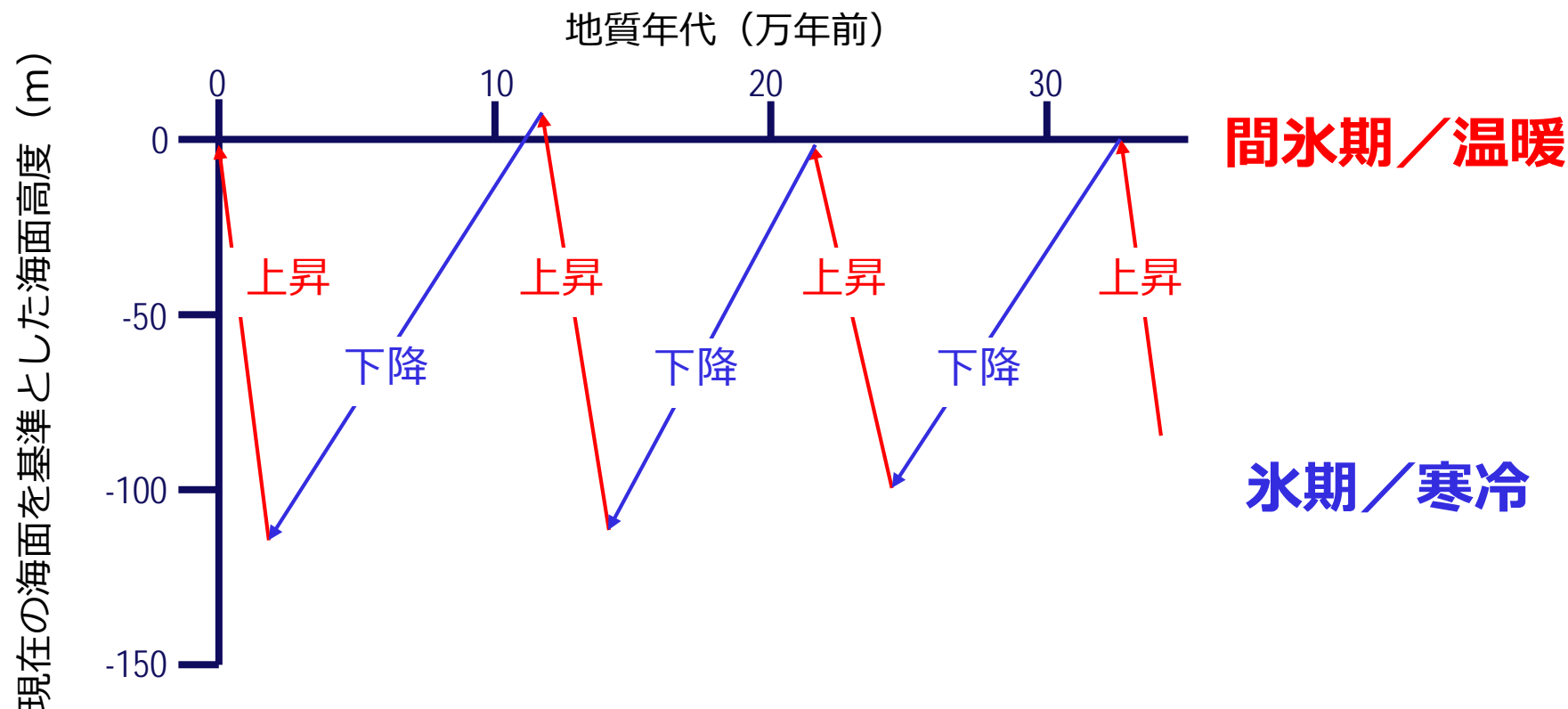
## ◆ 地質学的な見積り

- 地質学的に、浅い海に堆積した砂(地層)を探す。
- かつて浅い海(水際)に堆積した砂の層の上端の標高が隆起量。



2000年7月、幡谷竜太撮影

# 気候変動と海水準変動

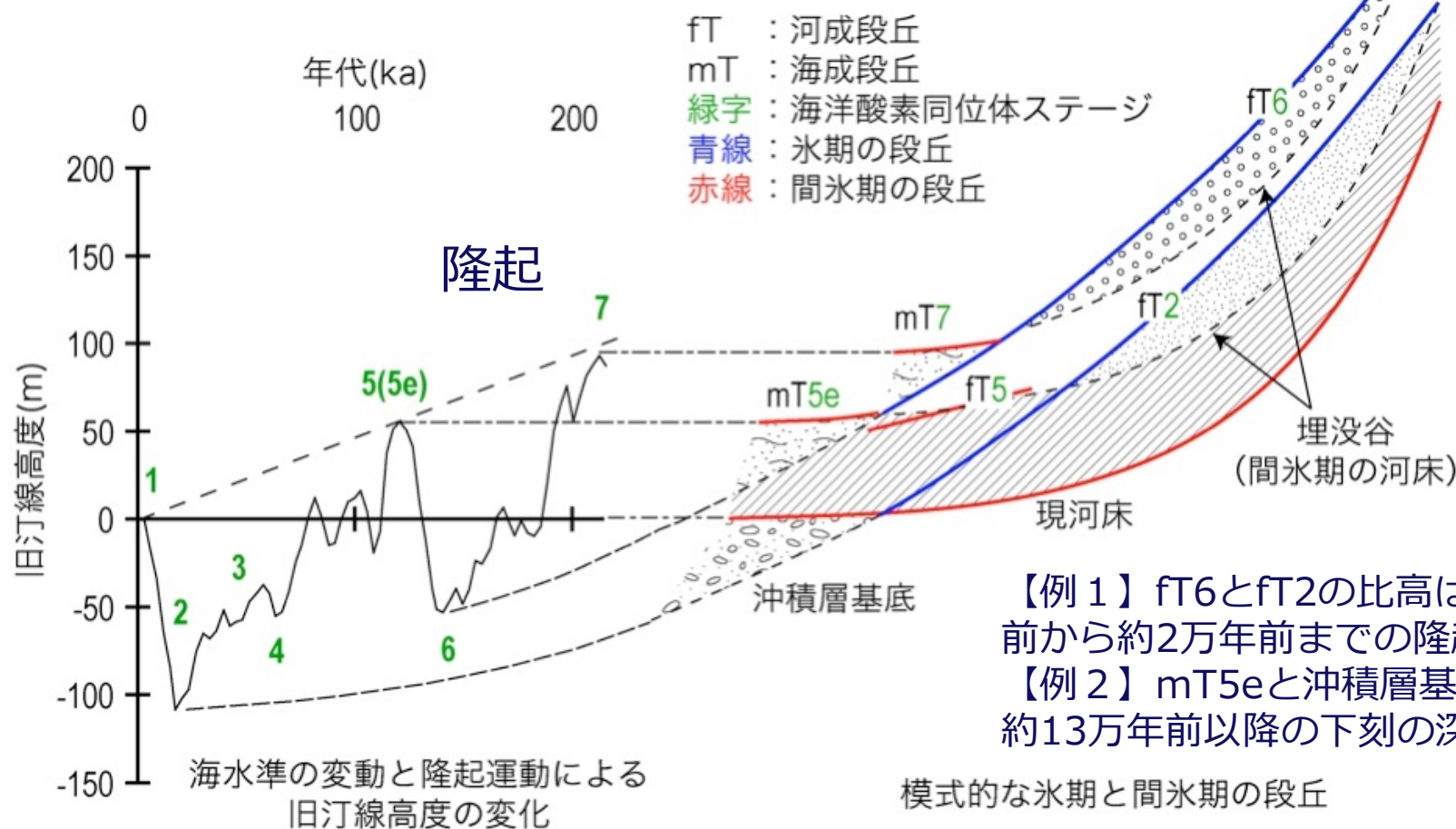


- ◆ 気候変動と共に海水準は上昇・低下を周期的に繰り返す。
- ◆ しばしば、この変動に伴って段丘が形成される。
- ◆ 海水準低下により沿岸海域が陸地になっても、隆起しなければまた海面下に没する。



# 段丘を用いた隆起・侵食(下刻)量の見積り(1)

周期的に訪れる同じ気候下では同じ縦断形状（地形断面）の河川が出現することを前提にして，埋没谷底同士，段丘面同士等の比高を気候変動1サイクルの隆起量と見なす。相対的に古い段丘面と相対的に新しい谷底の比高は，下刻の深さを表す。



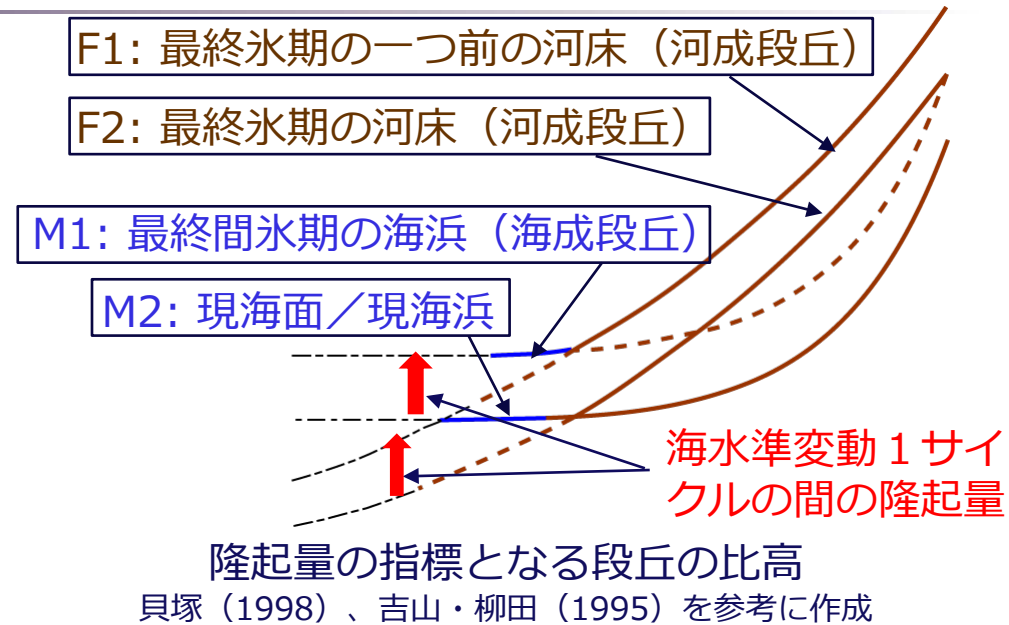
# 段丘を用いた隆起・侵食(下刻)量の見積り(2)

## ◆ 隆起量の見積り

- ① 複数の段丘について、それぞれができた時代を明らかにする。
- ② 氷期にできた段丘と間氷期にできた段丘を仕分けする。
  - 海成段丘は、海岸部に多く分布する。  
→沿岸部の隆起の指標
  - 大雑把に言えば、段丘面(旧河床)の氷期の河成段丘は内陸部多く見られる。  
→内陸部の隆起の指標
- ③ 至近に分布する氷期の段丘同士または間氷期の段丘同士の比高を測り、これを気候変動(海水準変動) 1 サイクル隆起量と見做す。
  - 右の写真で言えば、2つの時代が異なる河成段丘間の崖の高さが、両段丘の形成時期の間の隆起量と見做せる。

## ◆ 下刻量の見積り

- ① 沿岸部において、最終氷期(海水準がもっとも下がった時期)にできた谷の最大深さを明らかにする。
  - 谷を埋積した地層の最大の厚さを調べる





# 段丘ができた時代を知る／年代測定

河成段丘面



被覆層  
(第四系風成層/  
陸成層)

→段丘ができた後に  
風によって運ばれ  
てきた土や砂

段丘堆積物/礫層  
(第四系水成層)

→岩石表面の凸凹を埋  
めた礫や砂  
礫層の表面が段丘の  
原地形

基盤(新第三系)

→元々あった岩石

- ◆ 段丘を作る地層は、右に示したような3つの部分から成り立っている。写真では、礫層の上面がかつての河床面。
- ◆ 被覆層、段丘堆積物／礫層が堆積した年代を明らかにすることで、平坦な地形ができた年代を知ることができる。  
→ **礫層の堆積以降、被覆層の堆積以前**

- ◆ 多くの場合は、被覆層の中から降った時代が分かっている火山灰／テフラを見つけて堆積年代を見積ることが多い。
- ◆ 古い段丘面ほど、より古い被覆層が覆う。

# (参考) 段丘対比・編年の高度化

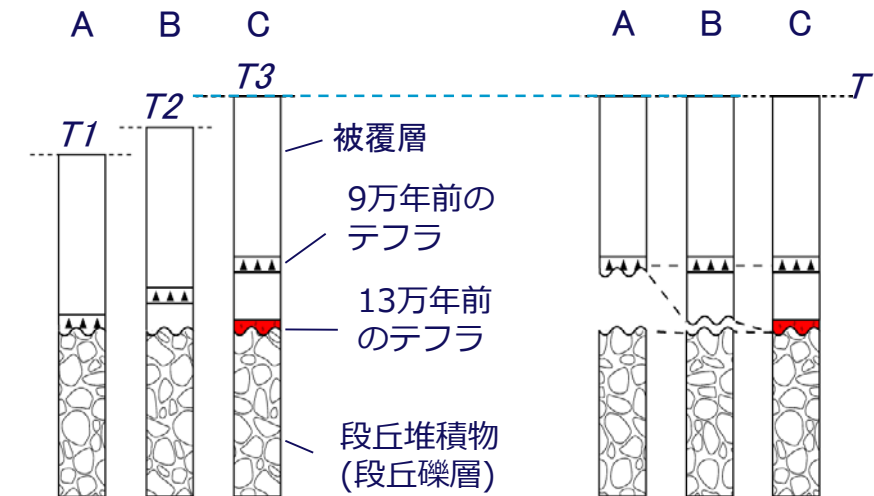
段丘が形成された時代を見積もる方法の信頼性を向上させる

- ◆ 段丘の形成年代は、基本的に、段丘堆積物と段丘被覆層の両堆積年代の間。しかし、地層の欠如、年代データの不足により、不確実性が生じる。
- ◆ 段丘の対比・編年は、主に以下の指標を考慮し、総合的に判断（すべての指標を矛盾なく説明できる解釈を提示）
  - 段丘面の開析度・分布（段丘の平坦面の連続性・形体・残存の程度など）
  - 段丘被覆層の層序・テフラ
  - 段丘堆積物、被覆層の風化程度
 ⇒ いずれも段丘面の形成年代を直接示すものではない＝解釈が入る点を再認識
- ◆ 1970年代以前は、当たり前のようにやっていた基本的なこと。しかし、テフラ層序という強力な年代データを手に入れ、テフラに引っ張られ過ぎた例も少なくない。
- ◆ 電中研の段丘対比・編年の高度化では、両者のバランスを取ることを重視。

例：3つの段丘露頭で成立する2通りの解釈

被覆層重視の解釈

地形層序重視の解釈



被覆層の層序の違いにより、異なる時期の段丘 (T1, T2, T3) と見なす

地形面としての類似性があれば、同一時期の段丘 (T) とみなす

(幡谷ほか, 2006に加筆)

# 河成段丘を用いた内陸部隆起量見積もり方法の検証

## 内陸部の隆起量の見積もりの信頼性向上

- ◆ 時間スケールが同じ事象（活断層）との比較を行った。
- ◆ 見積られた隆起量が妥当であれば，断層の両側での隆起量（沈降量）の差と断層の変位量（落差）は概ね等しいと期待される。
- ◆ 下記の例では、想定した通りのデータが得られ、河成段丘を用いた隆起量評価は妥当であると考えられる。

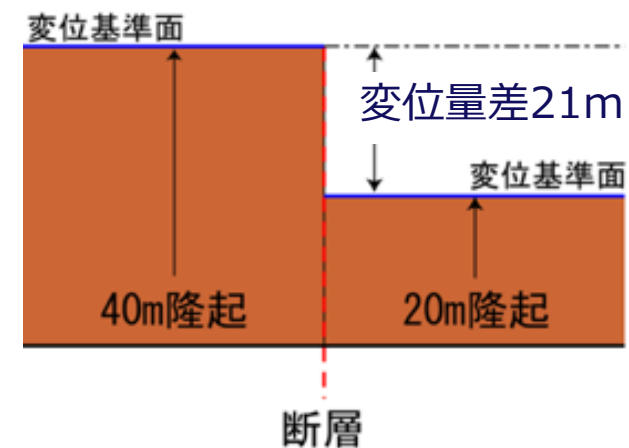
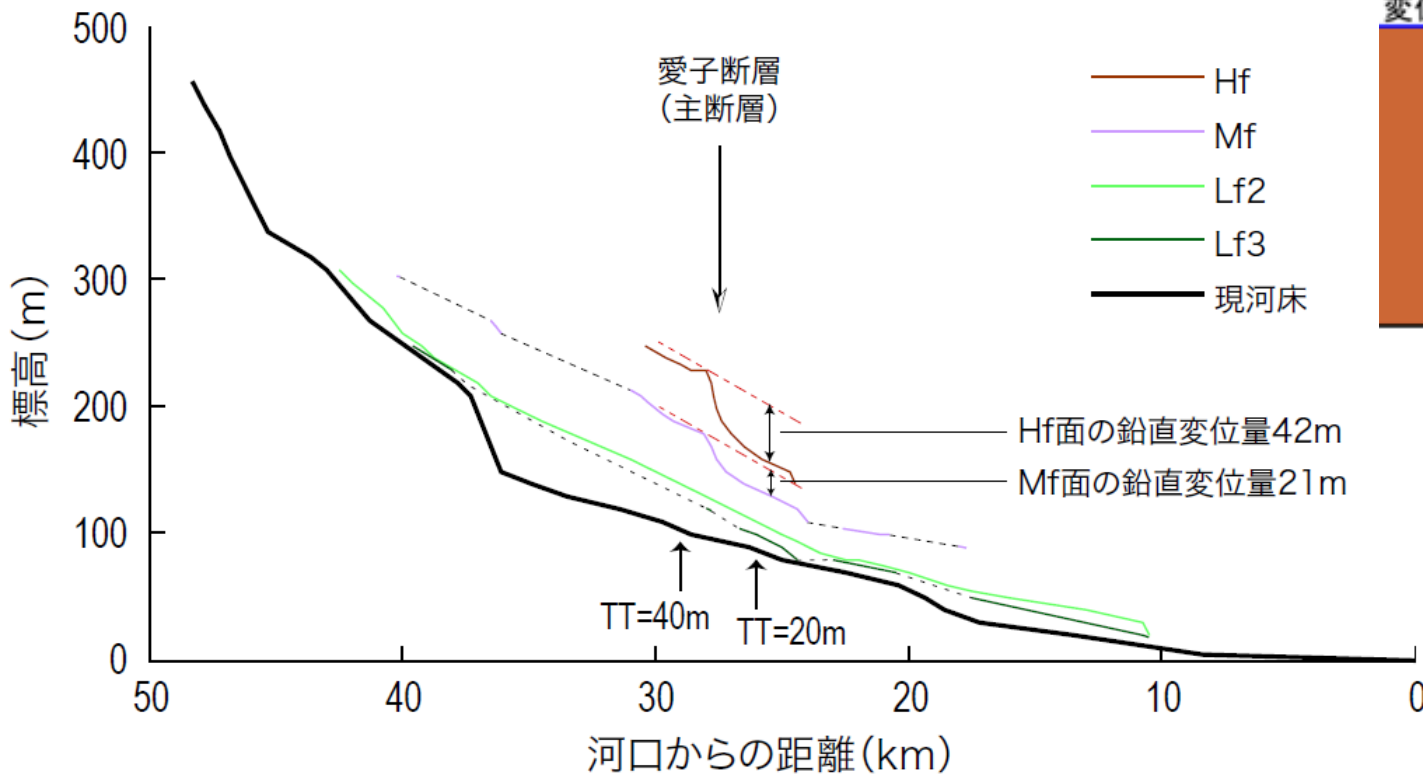


図 広瀬川の河床縦断図および愛子断層を挟む隆起量差と断層落差の比較

右図は調査結果を単純化したもの



# 内陸部の地殻変動の把握

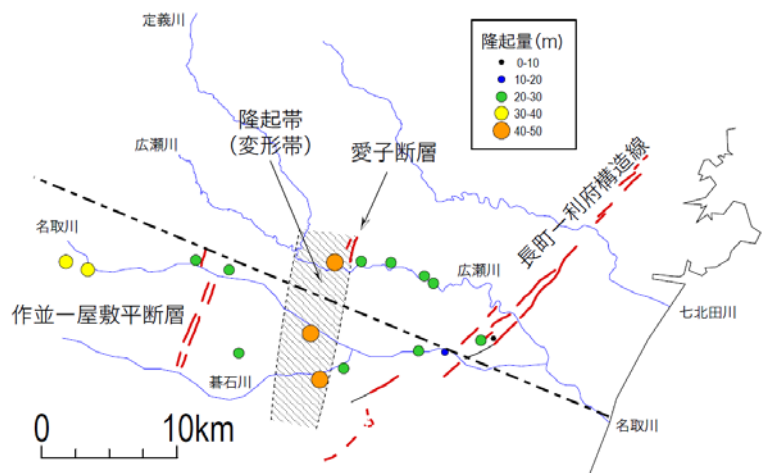


図1 隆起量の平面分布の調査  
(●が大きいほど隆起量大)

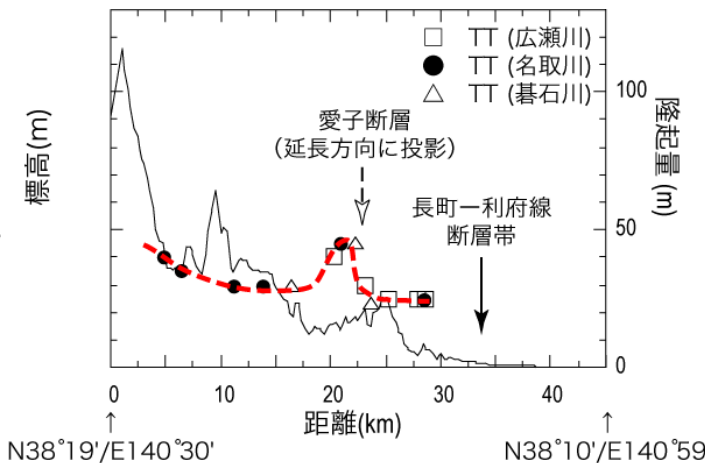


図2 隆起量の断面方向 (図1の黒一点鎖線) の分布の調査 (宮城県仙台市西部)

**隆起量分布からの活構造の検出(予想)**  
 構造と直交方向の範囲・規模を把握  
 愛子断層は大きな変形帯のごく一部  
 地表からの調査の効率化に貢献 (予測を立てる)

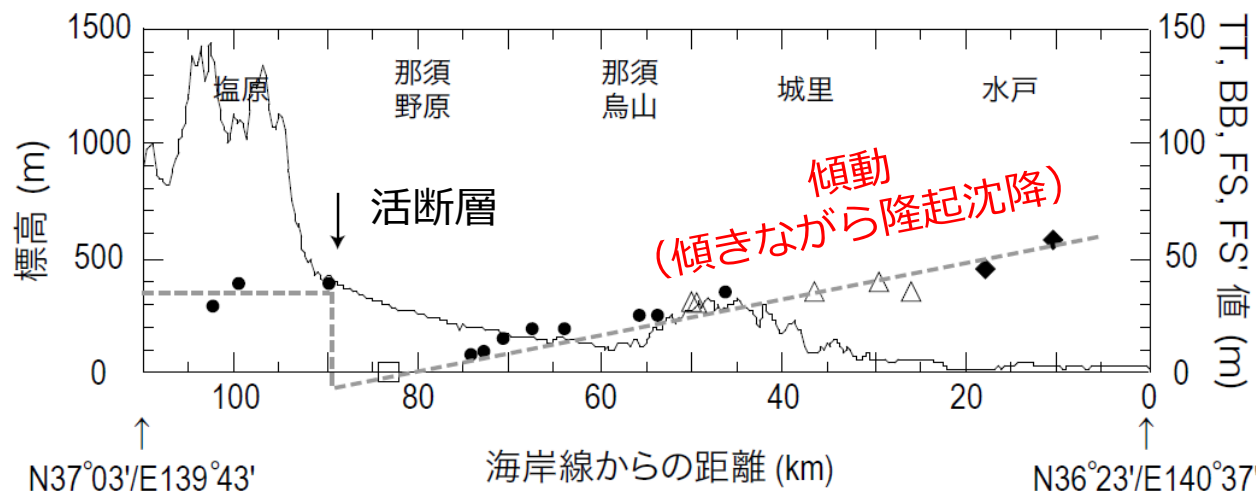
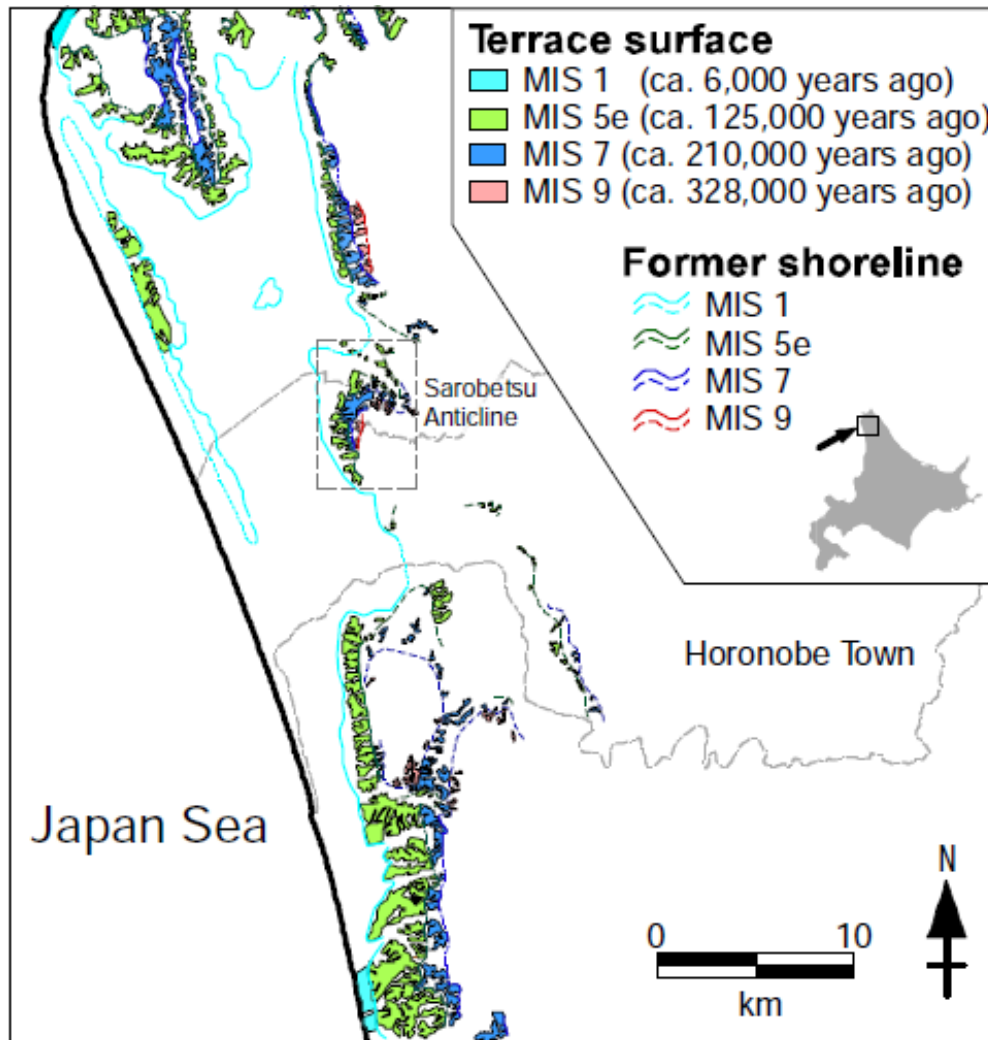


図3 隆起量の断面方向の分布の調査 (関東北部)

## 隆起・沈降様式の把握

関東北部山地の第四紀後期の西方への傾動運動を定量的に把握  
 北側の阿武隈山地でも西方への傾動が指摘されており、調和的。  
 隆起量データがない箇所への内挿・外挿。

# 幌延町付近の段丘の分布からまずわかること



## ◆ (細かいことは置いて) この図から読み取って欲しいこと

- できた時代が異なる段丘が何段もある
- 丘陵の縁を取り巻くようにして段丘が分布している
- 丘陵の中心部に近い側に高い段丘が分布し、それを低い段丘が取り巻く

## ◆ これらのことからわかること

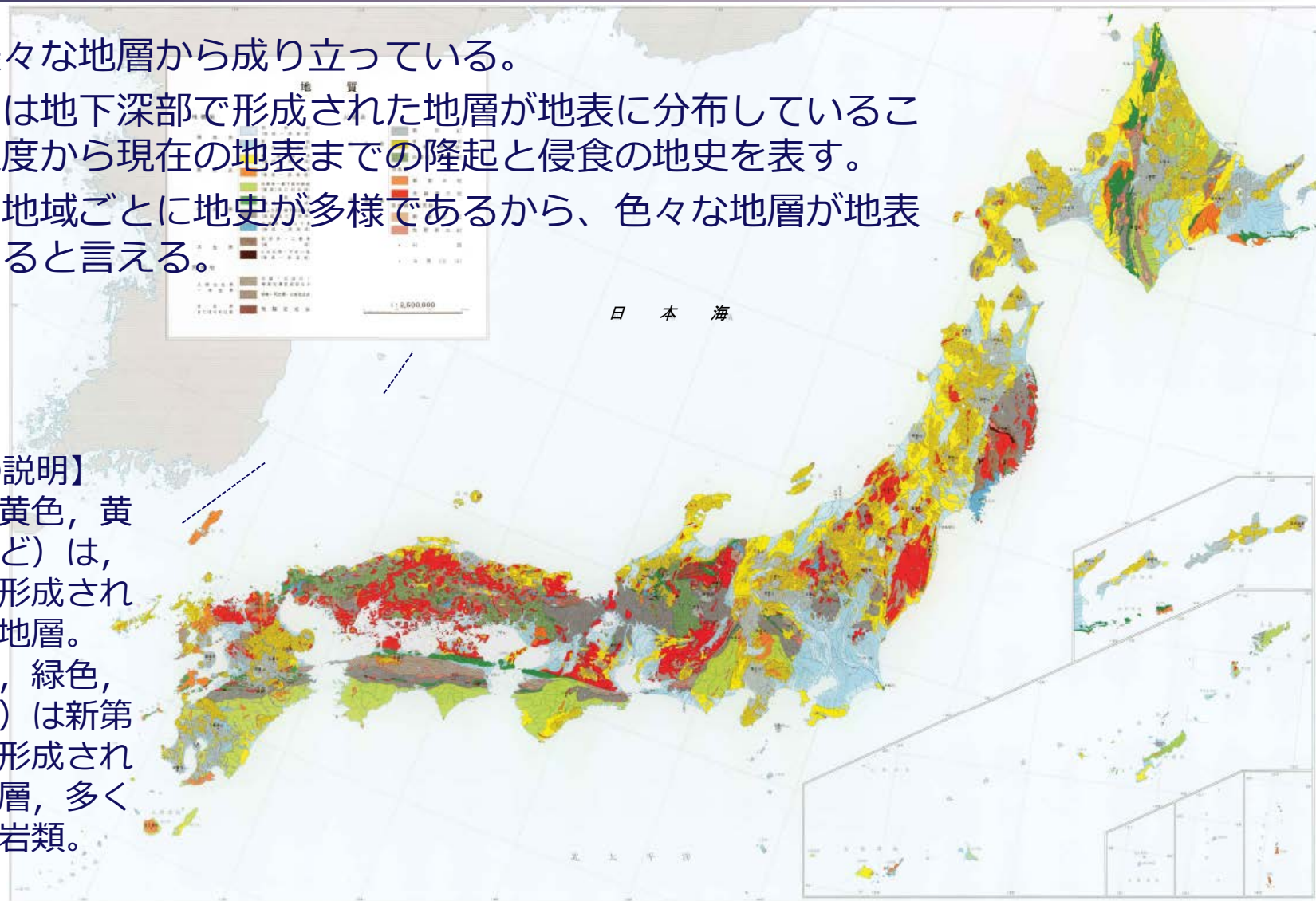
- 長い間、隆起が続いていた
- この隆起運動は、丘陵の形成と関わっている

## ◆ 関連する研究テーマ

- 具体的にどれぐらいの速さで隆起してきたか、しているか？
  - 段丘の形成年代を明らかにする
- なぜ隆起？
  - 段丘の時空分布、地質構造を明らかにする

# 日本列島の地質から読み取る隆起・沈降と堆積・侵食

- ◆ 日本列島は様々な地層から成り立っている。
- ◆ 水面下あるいは地下深部で形成された地層が地表に分布していることは、形成深度から現在の地表までの隆起と侵食の地史を表す。
- ◆ 逆に言えば、地域ごとに地史が多様であるから、色々な地層が地表に分布していると言える。



## 【大まかな地質の説明】

- 薄い色（水色，黄色，黄土色，黄緑色など）は、新第三紀以降に形成された比較的新しい地層。
- 濃い色（暗灰色，緑色，赤色，橙色など）は新第三紀よりも前に形成された比較的古い地層，多くは付加体と花崗岩類。

# 侵食（浸食）と侵食基準面

## ◆侵食（浸食）

- 地球の表面が雨・流水・風・波・雪・氷河などの外的営力で削られる作用。浸食作用とも。（中略）以上は機械的な浸食作用であるが，雨水や地下水の溶解作用による浸食は溶食という。（後略）

## ◆侵食基準面

- 地表面上に働きかける諸種の浸食作用の及ぶ下方の限界。浸食作用により土地は低下するが，一定の限界に達すれば浸食作用は止み，それ以下に及ばない。
- 基準面は，浸食作用の種類によって異なり，河食の場合には海面，溶食の場合には地下水面，山岳氷河の場合には雪線，海食の場合には，波食の及ぶ下限など。（後略）



# 河川による下刻

- ◆ 河川は地面を掘り込む。これを下刻という。
- ◆ 河川の下刻の深さは、あるところまで行くとそれ以上深くならない。
  - 内陸部では隆起量よりも深くならないと考えられている。
- ◆ 沿岸部の河口付近の下刻は、概ね海面より深く進まない。しかし、長期的に海面が下がった時には、下がった影響（深く掘られる）が出ると考えられる。



2005年5月、幡谷竜太撮影



# 沖積層と河川下刻

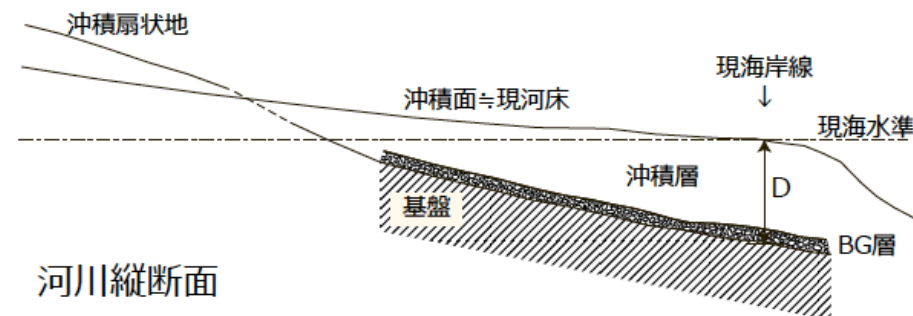
◆ 晩氷期および後氷期の氷河性海面変動／海面上昇に伴って水成堆積物すなわち沖積層が堆積し，それが作った堆積平野を沖積平野という。

◆ 最下位の埋没谷底面は，立川ローム層堆積期より後（概ね4～5万年前以降の最終氷期最盛期の低位海面を侵食基準面として形成された。

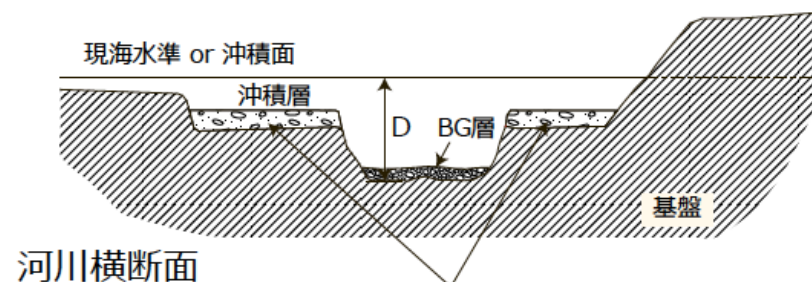
➤ この最下位の埋没谷底面を覆う礫層を最終氷期最盛期における低位海面に対応して形成された河成堆積層とし，沖積層基底礫層（BG層）と呼んだ。

◆ 臨海沖積平野の基底を成す埋積谷は，最終氷期の低位海面を示す優れた地形学的証拠である。

➤ **BG層基底の深さを下刻の深さと見做す**



河川縦断面



河川横断面

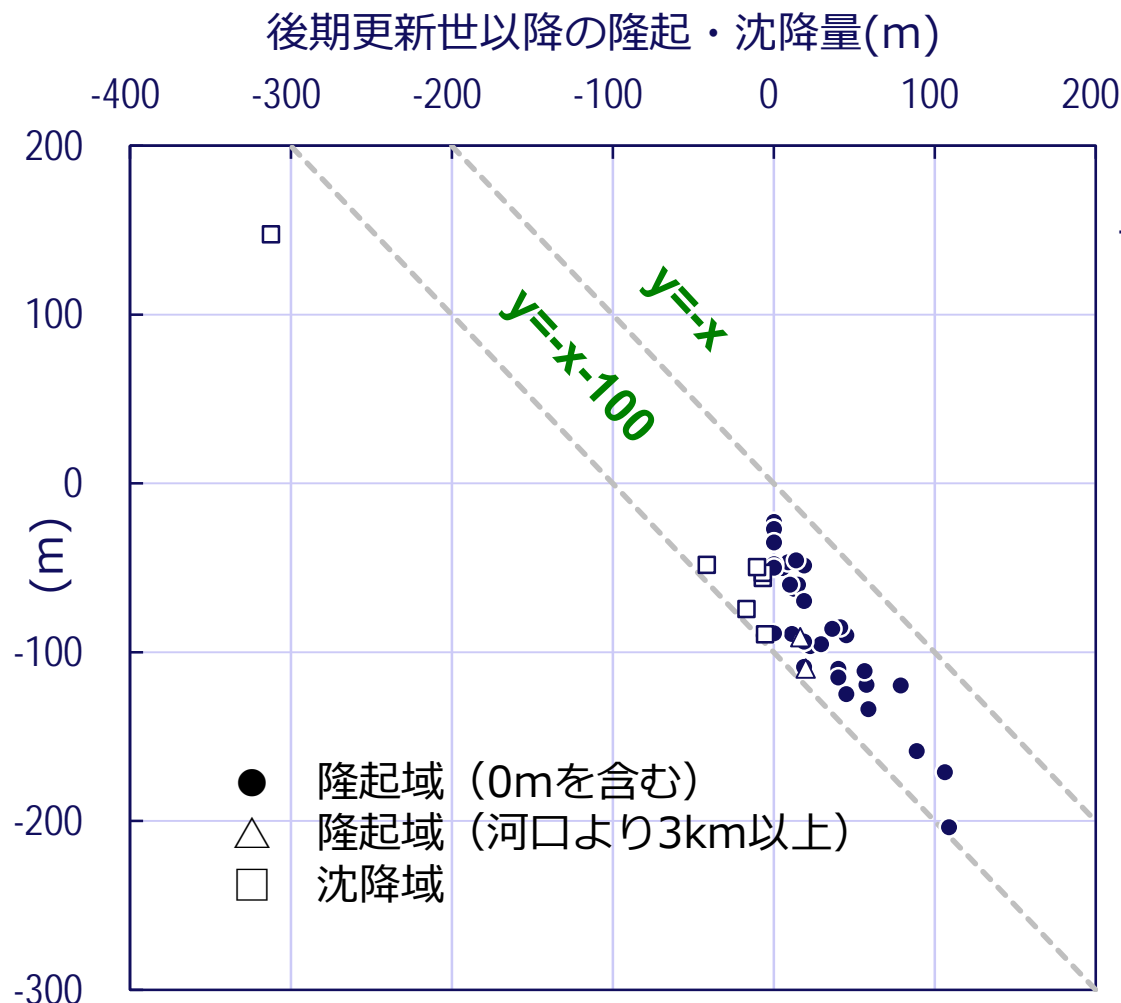
古い埋没段丘礫層

# 段丘と沖積層を用いた下刻侵食の研究

## 後期更新世以降 (MIS5e以降) の下刻

沖積層基底の最深部のMIS5e海成段丘(旧

汀線アングル, 海成層頂面)からの深度



◆ 最終間氷期極相期(約13万年前)を彫り込んだ谷の深さは、沖積層の厚さと旧汀線高度(≒海成段丘の高さ)の和である。

→ 後期更新世以降の下刻量

◆ 概ね、隆起量が大きいほど下刻量が大きい。

◆ 隆起域の現海岸線付近における後期更新世以降の最大下刻は、後期更新世以降の隆起分よりさらに最大100m程度深くなっている。

◆ 沈降域は課題が残る(沈降成分との区別が難しい)。

◆ 時間軸を反転させれば、将来予測を得る。

## 段丘と侵食

- ◆ 段丘は、 $10^4$ - $10^5$ 年スケールでは、基本的に侵食から取り残された場で、多くは風成層が堆積する場である。
  - しばしば、離水後に飛来した風成堆積物に覆われているのがその証拠。
- ◆ 段丘の縁辺部をなす段丘崖は、侵食によって形成されるものである。
  - 海沿い、川沿いの段丘崖は、侵食によって後退する（側刻）。
  - 段丘崖の基部が離水した後は、侵食・物質移動の場である（崖の上部で削剥、崖の基部で堆積 → 斜面過程）
  - 短期的な物質移動の代表的なプロセスが、河川による下刻・側刻、崩壊や地すべりである。
- ◆ 段丘面上で新たに河川が発生する、つまりは河川侵食（下刻、側刻）が始まることもある。

# 段丘から読み取ること



- ◆ <復習> 段丘の土台を作っているのは、元々そこにあった岩石や岩石の上の凸凹を埋めた礫や砂である。
- ◆ <復習> 段丘の上には、風によって運ばれてきた土や砂が堆積する。このようにできた地層を風成層と呼ぶ。概ね、古い段丘の上ほど、古い風成層が載る。
- ◆ 被覆層が残っているということは、段丘を成した地層が侵食されずに残っていることを示している。

被覆層  
(第四系風成層/  
陸成層)  
→風によって運ばれ  
てきた土や砂

段丘堆積物/礫層  
(第四系水成層)  
→凸凹を埋めた礫や砂  
この表面が段丘の原  
地形

基盤(新第三系)  
→元々あった岩石



# 段丘の経年変化（1）

段丘面が侵食されて、  
谷が刻まれる



侵食が進み、  
斜面が増える、  
凹地が増える、  
谷が深くなる。

保存が良くほぼ平坦  
段丘外縁が角張っている



2～3万年前にできた河成段丘

\* 2003年，幡谷竜太撮影

開析されて平坦面が少ない  
段丘外縁はなだらかな斜面

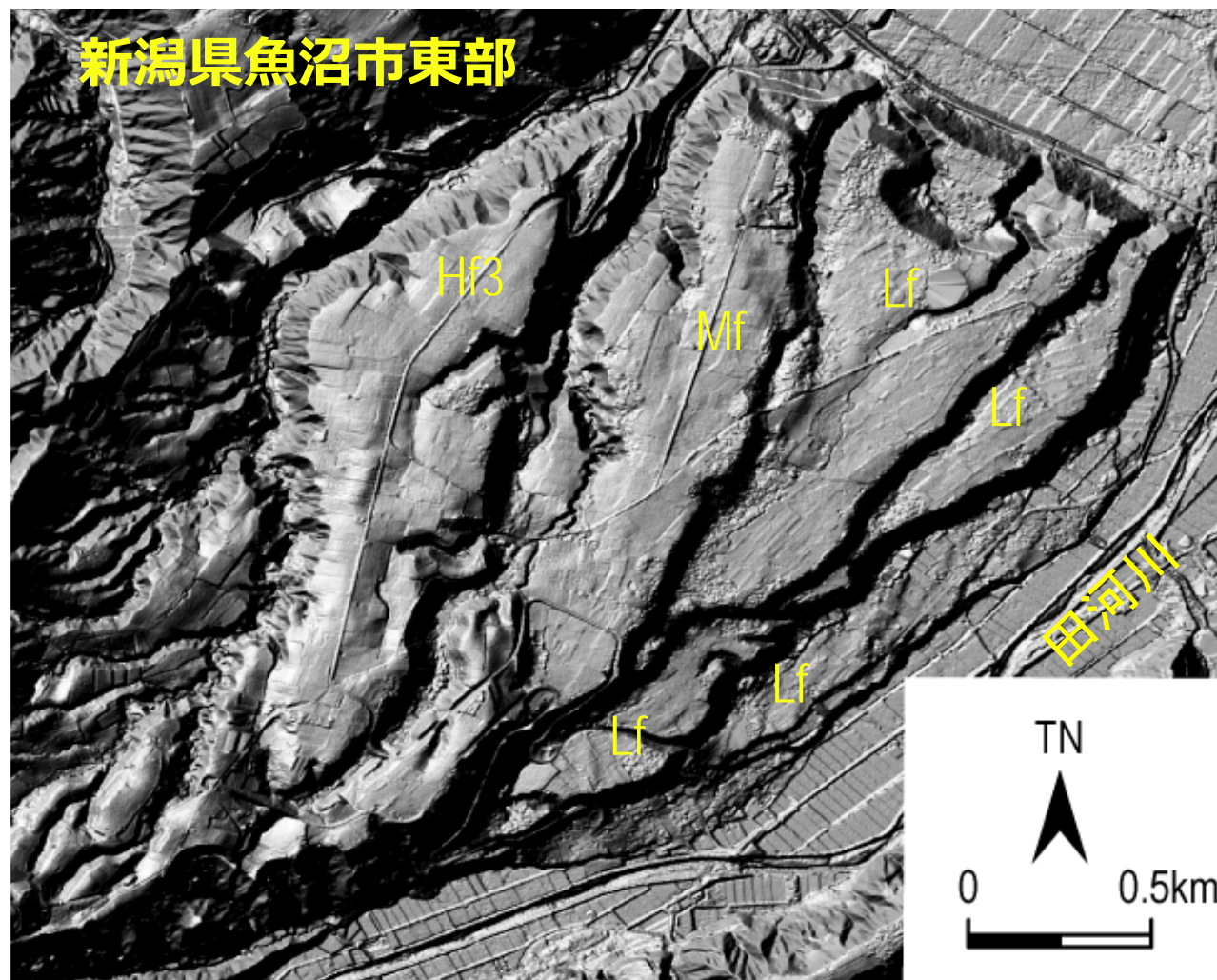


約40万年前にできた河成段丘

\* 2003年，幡谷竜太撮影



# 段丘の経年変化 (2)



## ＜高位段丘(Hf)＞

段丘面の開析が進み、尾根の頂部にわずかな平坦面を残しているに過ぎない。平坦面が少なく、尾根の高度が揃っているだけのこともある。

## ＜中位段丘(Mf)＞

段丘面の開析は進むが、比較的面の保存はよく、平坦面は半分程度残る。開析谷は一部で枝分かれしている。段丘の外縁は丸みをおび、平坦面にはわずかに緩やかな起伏が見られる。

## ＜低位段丘(Lf)＞

段丘面の保存はよく、段丘の外縁は角張っている。開析谷は線状で枝分かれしない。

→約25万年間の地形変化

航空レーザー測量による2mメッシュDEM(国際航業(株))を使用して作成

# 電中研が取り組んできた隆起・侵食の研究課題

## ◆要素技術

- 段丘の形成年代を求める方法の整備（高度化）

## ◆手法の検証

- 河成段丘の比高を指標とした内陸部の隆起量の見積り方法の検証

## ◆隆起量見積りを応用した地殻変動（現象）の把握

- 隆起量分布から見た第四紀後期（数十万年前以降）の地殻変動の把握

## ◆河川下刻（現象）の把握

- 海水準低下時の沿岸部での最大河川下刻量の見積り

# (参考) 電中研の最近の隆起と侵食の研究

- ◆ 宮城県川崎盆地名取川-碁石川沿いの段丘研究, 2005
  - 経験的指標の積極的活用 (先人の教え)
  - 保守的な段丘編年の修正 (MIS3→MIS6)
  - 隆起量指標, 過去10万年間の隆起速度の修正 (FS'→TT, 1/3~1/2)
- ◆ 茨城県~栃木県那珂川-箒川沿い, 2006
  - 河口から上流まで川全体で段丘対比・編年を考える (先人の教え)
  - 総合的な対比・編年への回帰
- ◆ 河成段丘による内陸部隆起量の見積り方法の検証と応用, 2006
- ◆ 段丘面の開析の定量化, 2007
  - 低位段丘・中位段丘・高位段丘には年代観を持たせてよし
- ◆ 新潟県中越地域信濃川沿い・魚野川沿い, 2008
  - 総合的な段丘対比・編年の実践, 内陸部隆起特性評価
- ◆ 経験的段丘対比・編年指標の復権, 2008~
- ◆ 後期更新世以降の現海岸線付近の下刻, 2016

# まとめ

- ◆ 地形・地質から隆起沈降と堆積侵食の地史を読み取る。
  - 地史の研究には時間スケールに見合った地形・地質に着目する必要がある。
- ◆ 複数の氷期・間氷期の気候サイクルを含む $10^4$ ~ $10^5$ 万年オーダーの時間スケールにおいて、段丘は歴史を解く鍵。
  - 隆起運動の把握や隆起量の見積り指標
  - 侵食の深さの基準（ゼロ点）
- ◆ 河川による下刻侵食は、谷の深さ、あるいは、古い谷を埋めた地層の厚さから見積もる。
  - 海水準の影響を考慮しても、下刻には限界がある。
  - 段丘は~ $10^5$ 万年の時間スケールで侵食から逃れた場所。それを超える時間スケールでは、侵食によりやがて消えていく。
- ◆ 地形学・地質学の研究では、どこにどんなものが分布するか、それらはいつできたかを明らかにすることが基本。

# 原子力機構・産総研・電中研の共同研究

- ◆ 現在、原子力機構、産総研、電中研は、地質・地下水の調査・評価技術の開発にかかわる共同研究を進めている。
- ◆ それぞれの組織が得意分野を分担し、相乗効果を狙う。

## 主な調査・解析・室内試験の分担

日本原子力研究開発機構	産業技術総合研究所	電力中央研究所
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 隆起侵食評価手法の検討               <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 地質年代測定（試料採取、侵食年代測定、堆積物年代測定等）</li> <li>➢ 海域地形調査および解析</li> </ul> </li> <li>● 断層調査手法の検討</li> <li>● 火山調査手法の検討</li> <li>● 水質分析</li> <li>● 地質環境情報の整備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地下水採水</li> <li>● 水質分析</li> <li>● 地下水流動解析</li> <li>● 地質環境情報の整備</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 隆起侵食評価手法の検討               <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 陸域地形・地質調査および解析</li> <li>➢ 地質年代測定（試料採取、段丘対比・編年）</li> </ul> </li> <li>● 海域地質解析</li> <li>● 地下水年代測定</li> </ul>



# 連携の例：幌延町浜里地区における地下水調査



- 沿岸部の地下水の特徴を調べるため、**産総研**は、過去の研究で掘削した井戸から採水した地下水を調査している。
- 採水試料の水質分析については、**電中研**と**原子力機構**も参加している。

# 引用文献・参考文献

- Chappell, J. (1994) Upper Quaternary sea level coral terraces, oxygen isotopes and deep sea temperatures, *Journal of Geography*, 103, 828-840.
- 地学団体研究会編(1996)新版地学事典, 平凡社.
- 地質調査所(1982) 日本地質アトラス
- 幡谷竜太(2005)河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討(1)段丘対比の考え方の提案と河成段丘の編年に関わるケーススタディー, 電力中央研究所報告, N05005, 28p.
- 幡谷竜太ほか(2005)宮城県陸前川崎盆地における海洋酸素同位体ステージ6河成段丘の認定とその意義, 第四紀研究, 44, 155-167.
- 幡谷竜太(2006a)河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討(2)長大な河川沿いに分布する河成段丘の層序, 電力中央研究所報告, N05016, 30p.
- 幡谷竜太(2006b)河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討(3)河成段丘を用いた過去10万年程度の隆起量評価手法の検証と応用, 電力中央研究所報告, N05017, 21p.
- 幡谷竜太ほか(2006)新潟県魚沼丘陵北部の河成段丘の層序, 応用地質, 47, 140-151.
- 幡谷竜太・濱田崇臣(2008)河成段丘の分布から見た活構造, 電力中央研究所報告, N08044, 33p.
- 幡谷竜太ほか(2016)後期更新世以降の現海岸線付近での下刻, 応用地質, 57, 15-26.
- 磯崎行雄ほか(2010)日本列島の地体構造区分再訪—太平洋型(都城型)造山帯構成单元および境界の分類・定義—, 地学雑誌, 119, 999-1053.
- 貝塚爽平(1998)発達史地形学, 東京大学出版会.
- 太田久仁雄ほか(2007)幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書、分冊「深地層の科学的研究」、JAEA-Research-2007-044.
- 鈴木隆介(2000)建設技術者のための地形図読図入門, 第1～4巻, 古今書院.
- 山本真哉ほか(2008)数値標高モデルを用いた段丘面形状の定量化と段丘対比への応用, 電力中央研究所報告, N07017, 25p.
- 吉山昭・柳田誠(1995)河成地形面の比高分布から見た地殻変動, 地学雑誌, 104, 809-826.

ご清聴ありがとうございました

**R** 電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry