

現地調査における 地形情報取得のため のGNSSとTLS

早川裕弐

東京大学空間情報科学研究センター

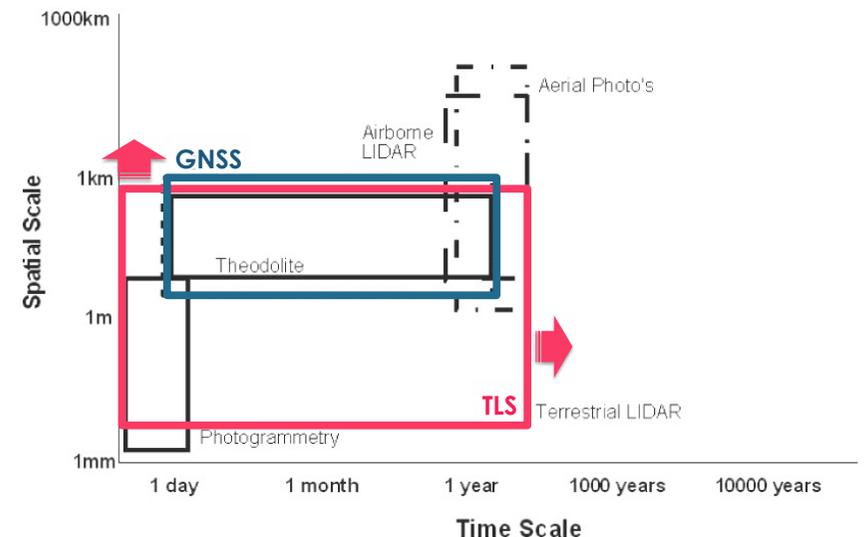
今日の話題

- はじめに
- GNSSのしくみ
- レーザ測量のしくみと種類
- 地考古学・地形学の現場における地形測量
 - GNSSのみ (D, PPK/RTK)
 - レーザ測量 (LRF)
 - レーザ測量 (LRF, TLS) + GNSS (D, PPK)

GNSSやレーザ測量による地形情報

- 機材の性能向上にともなう...
 - 高精度化・高解像度化
 - 高価格化・データ処理の複雑化
- 本当に必要なのは？
 - 対象とするものの規模・形状
 - 現象の解明のために
- 実例を通して考察

spatial & time scales by GNSS & TLS

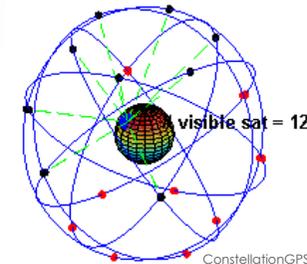


extents of temporal and spatial scales covered by each measurement method
(after Heritage and Hetherington, 2007)

GNSSのしくみ

GNSS – Global Navigation Satellite System

- 衛星からの電波を受信することにより、緯度・経度・高度の連続観測ができる測位システム
- GNSS：衛星測位システムの総称
 - GPS（アメリカ合衆国）、Galileo（ヨーロッパ連合）、GLONASS（ロシア）、北斗（中国）、QZSS（日本）



GPS – Global Positioning System

- 1978 最初の測地衛星の打ち上げ
- 1993 システムの正式運用
- 1996 平和的民生利用への政策指針
- 1998 GPS利用の日米協力推進体制
- 2000 May 精度劣化操作（SA）の解除

現在：衛星数24個（予備含め約30個）

△ GPS

◎ GNSS

iPod/Walkman

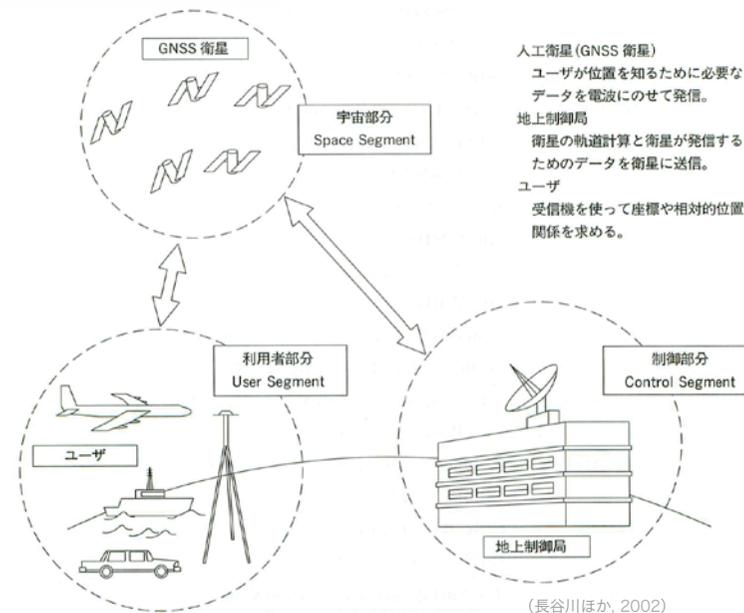
VS.

携帯音楽プレーヤ

様々なGNSS受信機

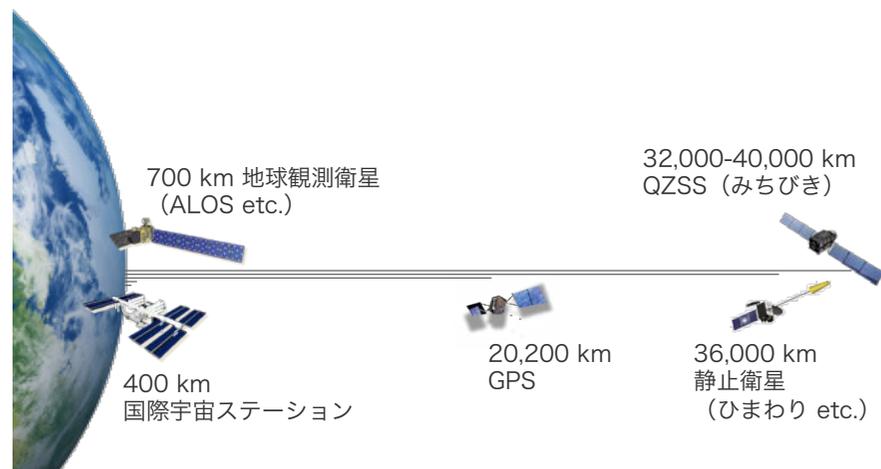
- カーナビ
- ケータイ
- スマートフォン
- デジカメ
- 汎用ハンディ受信機
- 測量用受信機&アンテナ
-

GNSSの基本構成



GPS衛星からの電波信号

- 2種類の搬送波
 - L1帯 : 1,575.42 MHz
 - L2帯 : 1,227.6 MHz
- 測距信号
 - 混線防止と衛星識別のため、疑似ランダム雑音符号 (PRN) により暗号化される
 - C/Aコード : L1波、民生用に開放
 - P(Y)コード : L1・L2波、米軍用に限定(観測は可能)
- 補正信号
 - SBAS (Satellite-Based Augmentation System)



GNSS測量の分類と概要

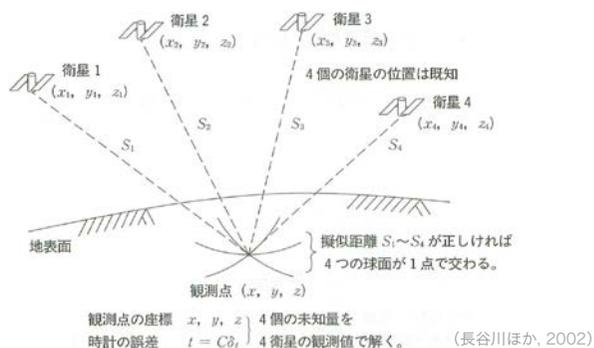
GNSS (GPS) 測位法の種類		観測時間	成果解析	測位精度 (水平方向)	適用領域	
単独測位		数秒～数分	リアルタイム	10 m～	船・車などのナビゲーション	
相対測位	ディファレンシャル法 (DGNSS)	数秒～数分	リアルタイム/後処理	0.1～数 m	航空機のナビゲーション、船位測量、工事用車両の運行管理	
	干渉測位	スタティック法	>60分	後処理	5 mm	1～4級基準点測量、地すべり観測
		短縮 (高速) スタティック法	10～20分	後処理	5 mm	3～4級基準点測量
		後処理キネマティック法 (PPK)	>1分	後処理	10-20 mm	3～4級基準点測量
	リアルタイムキネマティック法 (RTK)	数秒～1分	リアルタイム	10-20 mm	3～4級基準点測量、地籍測量、公共測量	

GNSS受信機価格帯 (JPY)

- 単独測位 数千～数万
- 精度: 10^1 m
- ディファレンシャル測位 数十万
- 精度: $10^{-1} \sim 10^0$ m
- 干渉測位 (RTK, VRS, スタティック) 数百万
- 精度: $10^{-3} \sim 10^{-2}$ m

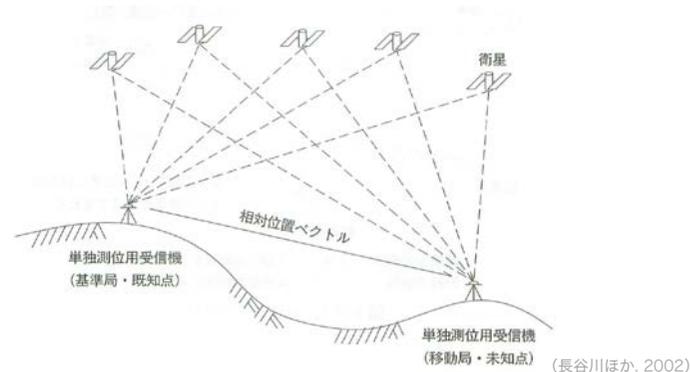
単独測位

- 1台の受信機を用いて同時に**4個以上**の衛星からの電波を受信
- 測点から各衛星までの距離
→ 後方交会法によって観測点の位置を求める



ディファレンシャル測位 (DGPS)

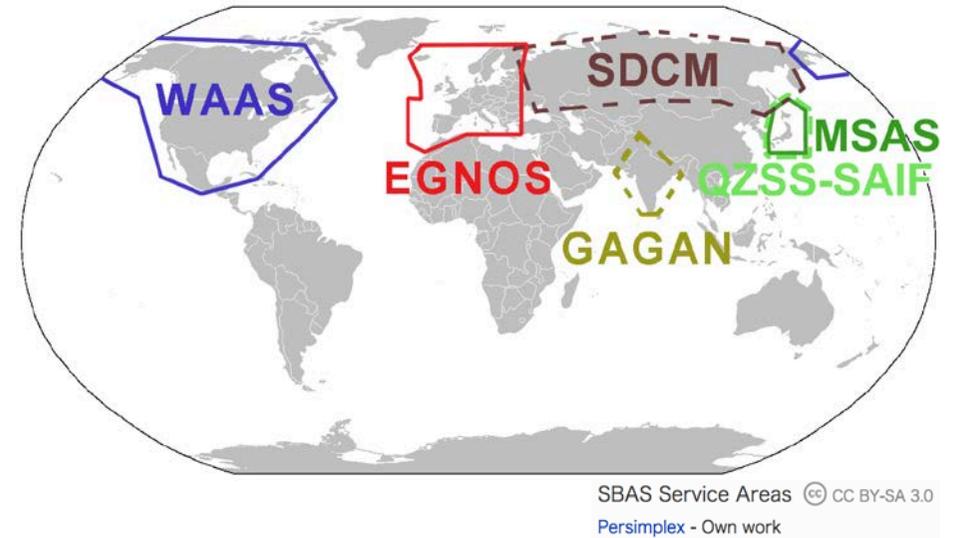
- 複数の観測点 (基準局と移動局) で同時に単独測位を行い、固定された基準局からの相対位置で移動局の誤差補正を行う。



SBAS (Satellite-Based Augmentation System)

- 補正信号が**静止衛星**から送信される
 - リアルタイムなディファレンシャル測位
 - 精度：5 m 程度
- 地域別に運用
 - 静止衛星であるため常時捕捉可能
 - 米国：WAAS (Wide Area Augmentation System)
 - EU：EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service)
 - 日本：MSAS (MITSAT-based Satellite Augmentation System) =ひまわり
- 航空機やハンディGPSにも搭載

各地域におけるSBASの運用



米国WAAS：2003年7月～ 日本MSAS：2007年9月～
欧州EGNOS：2005年～ インドGAGAN：2013以降

干渉測位

- 搬送波の位相差を利用する
高精度測位法
- 基線解析
 - 2台の受信機 (基地局・移動局)
→同時に受信した搬送波の位相差を測定
 - 基線ベクトル (受信機間の距離と方向) の算定
- 整数値バイアス
 - 位相差測定で読み取り可能なのは1波長未満だけで、整数部分は不確定
 - 観測開始時にこれの確定 (初期化) が必要

干渉測位の種類

- 静的干渉測位 (スタティック法)
 - 1時間以上の連続観測
 - 高速 (短縮) スタティック法：10～20分
- 動的干渉測位 (キネマティック法)
 - 初期化 (整数値バイアスを決定・保存) 後、後処理で基準局と移動局間の基線ベクトルを算出
 - 測点ごとの整数値バイアスの確定作業が不要
 - 各測点において数秒～1分程度の観測
 - リアルタイムキネマティック (RTK) 測位
 - 基線解析のリアルタイム処理
 - 基準局と移動局間相互の無線通信 (Bluetoothや携帯電話網 (VRS) など)

電子基準点

- 国土地理院が全国約1,200箇所に設置しているGPS連続観測局
- 1994年～
- 地殻変動等の連続観測
- ディファレンシャル／キネマティック補正のための基準局データを提供
 - 先月（6/29）リニューアル



準天頂衛星システム

- QZSS: Quasi-Zenith Satellite System
 - 宇宙航空研究開発機構（JAXA）
- 準天頂衛星初号機みちびき（QZS-1）
 - 2010年9月11日打ち上げ
- GPSの補完・補強
 - 常に天頂付近に衛星がある！
 - 補正信号 → 測位精度を高める
 - 目標精度
 - 高速移動体で1 m以下
 - 低速移動体で数cm



<http://qz-vision.jaxa.jp/>

レーザ測量のしくみと種類

レーザ測量

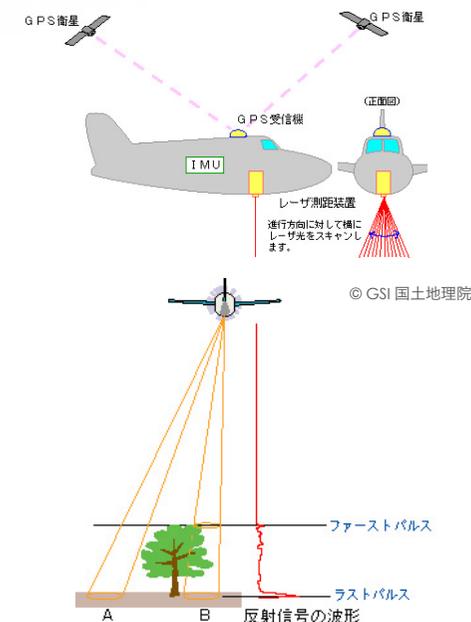
- LASER
 - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- LiDAR : Light Detection And Ranging
 - レーザ光を測定対象物に照射し、その反射光を受信することによりその物理的情報を得る技術。
- 発射後、対象物に反射して戻ってくるまでの往復時間やその強度を計測
- 時間×光の速度（ 3×10^8 km/s）＝距離

レーザ測量の種類

- 衛星レーザ測量
 - プロファイラ
 - e.g., 火星 (Mars Orbiter Laser Altimeter)
- 航空レーザ測量
- 地上レーザ測量
 - 3次元レーザスキャン (TLS)
 - レーザ距離計 (LRF)
 - モバイルレーザスキャン (MLS)
- 卓上型3次元レーザスキャナ

航空レーザ計測システム

- GNSS：器械点計測
- レーザ測距装置
- IMU：姿勢計測



地上レーザスキャナ

メーカー	機種名	測定方式	最大測定距離 (m)	④反斜率 (%)	精度 (mm)	④距離 (m)	最高測定速度 (m/s)	レーザ波長 (nm)	レーザ安全基準	説明解	視野角 (水平/垂直) (°)	計測視野区分	重量 (kg)	外形 (W x H x D, mm)	カメラ	防水・防塵	ソフトウェア	価格帯
FARO	Focus3D S120	PH	120	(90)	±2 (±25)	976,000	905	Class 3R	不可	不可	300 x 360	Panorama	5.0	240 x 200 x 190	内蔵型	-	SCENE	A
Trimble	TX5	PH	120	(90)	±2 (±25)	976,000	905	Class 3R	不可	不可	300 x 360	Panorama	5.0	240 x 200 x 190	内蔵型	-	RealWorks	A
Leica Geosystems	ScanStation P20	ToF	120	(18)	±8 (100)	1,000,000	808	Class 2	可	可	270 x 360	Panorama	11.9	358 x 395 x 238	内蔵型	IP54	Cyclone	-
Leica Geosystems	ScanStation C10	ToF	300	(90)	±4 (-)	50,000	532	Class 3R	不可	不可	270 x 360	Panorama	11.0	358 x 395 x 238	内蔵型	IP54	Cyclone	C
FARO	Focus3D X330	ToF	330	(-)	±2 (-)	976,000	1,550	Class 1	不可	不可	300 x 360	Panorama	5.2	240 x 200 x 190	内蔵型	-	SCENE	-
TOPCON	GLS-1500	ToF	500	(90)	±7 (150)	30,000	1,535	Class 1	不可	不可	70 x 360	Hybrid	16.0	240 x 566 x 280	内蔵型	IP52	ScanMaster	B
RIEGL	VZ-400	ToF	600	(90)	±5 (-)	122,000	1,550	Class 1	可	可	100 x 360	Hybrid	9.6	180 x 308 x 180	外付型	IP64	RScan Pro	C
MDL	Quanyman Pro	ToF	600	(90)	±50 (-)	250	250	非外蔵	Class 2M	不可	135 x 360	Hybrid	8.1	177 x 410 x 239	-	IP66	Model	A
RIEGL	VZ-1000	ToF	1,000	(90)	±8 (-)	122,000	1,535	Class 1	可	可	100 x 360	Hybrid	9.8	200 x 308 x 200	外付型	IP64	RScan Pro	C
MDL	Quanyman Pro LR	ToF	1,200	(90)	±50 (-)	250	250	非外蔵	Class 3R	不可	135 x 360	Hybrid	8.1	177 x 410 x 239	外付型	IP66	Model	A
Optec	HLRS-3D	ToF	1,200	(80)	±7 (100)	2,500	1,535	Class 1	不可	不可	40 x 40	Camera	13.0	320 x 220 x 320	内蔵型	IP65	PolyWorks	B
Optec	HLRS-HL-R	ToF	1,700	(80)	±7 (100)	10,000	1,535	Class 3M	不可	不可	40 x 40	Camera	14.0	320 x 220 x 320	内蔵型	IP65	PolyWorks	B
RIEGL	VZ-4000	ToF	4,000	(90)	±15 (-)	220,000	1,535	Class 1	可	可	60 x 360	Hybrid	14.5	226.3 x 450 x 236	外付型	IP64	RScan Pro	C
RIEGL	VZ-6000	ToF	6,000	(90)	±15 (-)	220,000	1,535	Class 3B	可	可	60 x 360	Hybrid	14.5	226.3 x 450 x 236	外付型	IP64	RScan Pro	D
RIEGL	LPM4-221	ToF	6,000	(80)	±25 (-)	1,000	1,000	非外蔵	Class 3M	可	150 x 360	Hybrid	16.0	370 x 450 x 315	-	IP64	RScan Pro	C



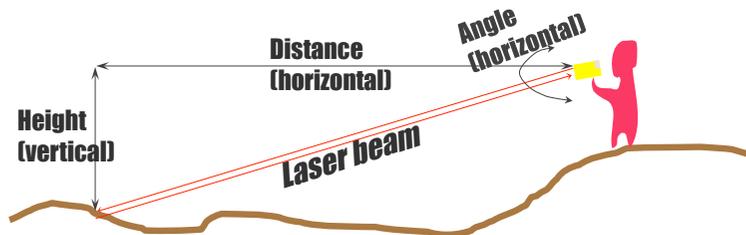
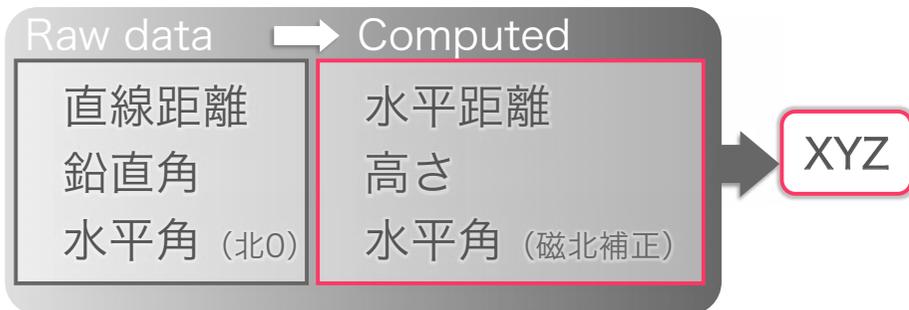
List of available terrestrial laser scanners in Japan. PB: Phase-based method, ToF: Time-of-Flight method. See Fig. 3 for the type of field of view. The weight does not include batteries. The price range is an approximate classification as: A: <10M, B: 10-20M, C: 20-30M, D: >30M (JPY)

laser range finder (LRF) measurement



Hayakawa, Y.S., Oguchi, T., Komatsubara, J., Ito, K., Hori, K., Nishiaki, Y. 2007. Rapid on-site topographic mapping with a handheld laser range finder for a geoarchaeological survey in Syria. *Geographical Research*, 45 (1), 95-104.

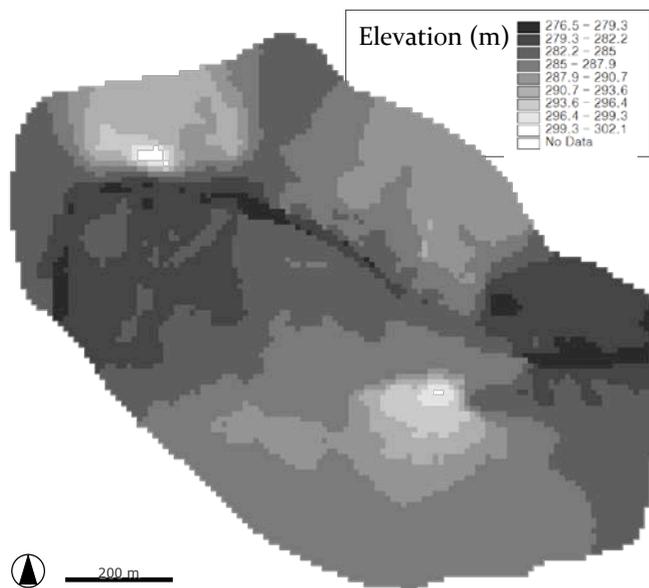
レーザー計測データの変換



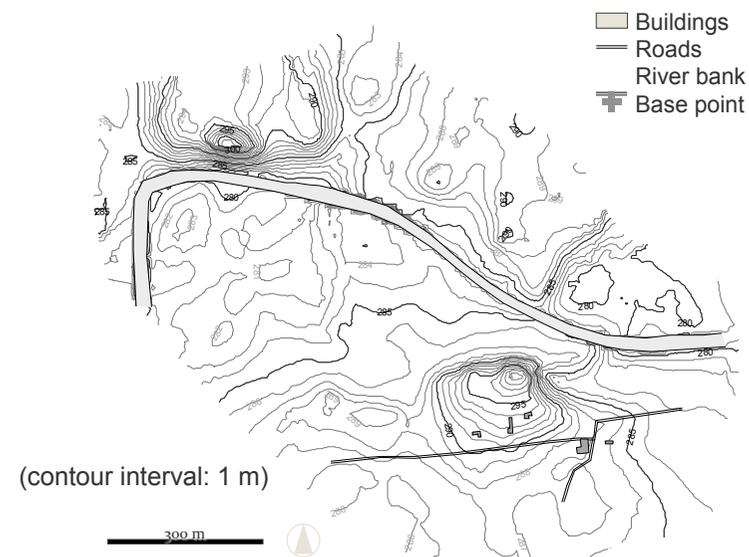
Point cloud – sparse!



10-m DEM (kriging interpolation)



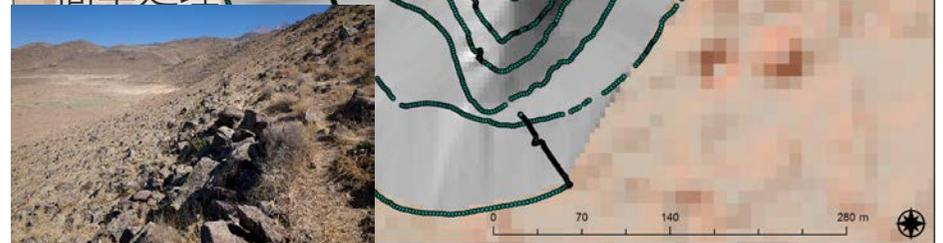
Overlay – Topographic map



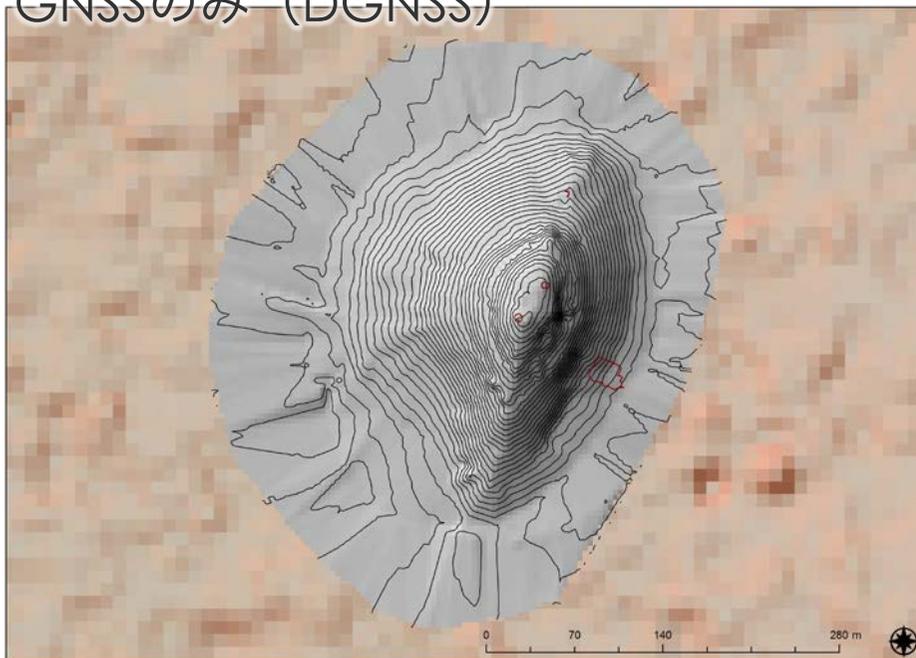
地形測量におけるGNSSとレーザ 測量 (LRF, TLS)

GNSSのみ (DGNSS)

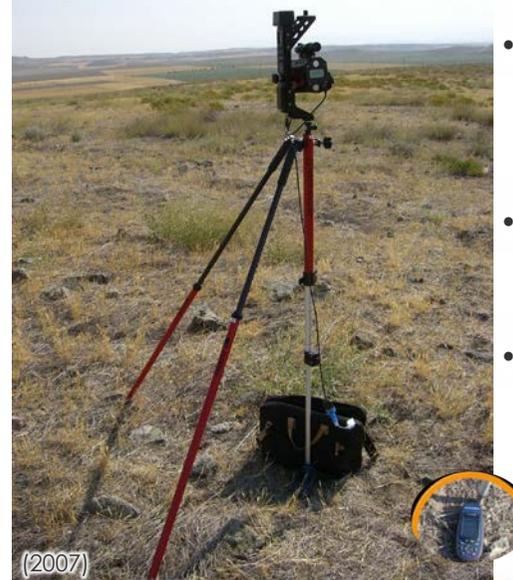
- 9 km in 1.5 hrs
- 300 m x 400 m area
- post-processing differential correction
 - accuracy: 0.6 m
- 简单処理



GNSSのみ (DGNSS)



LRF + DGNSS combination

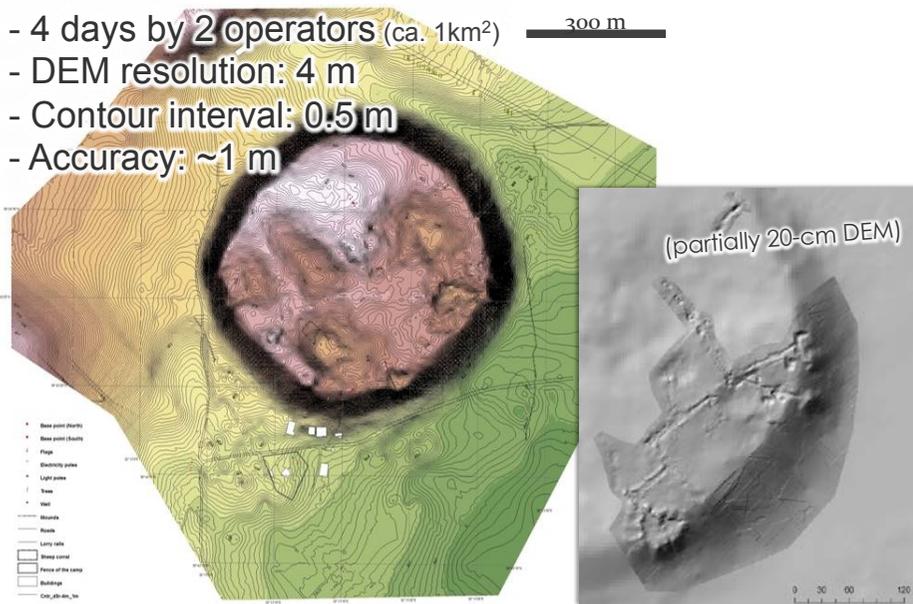


- **LRF with digital compass**
 - Impulse 200 LR & Mapstar by LaserTech
- **DGNSS**
 - MobileMapper Pro by Thales Navigation
- Operating PC

(2007)
Hayakawa, Y.S. and Tsumura, H. (2009) Utilization of laser range finder and differential GPS for high-resolution topographic measurement at Hacifuğrul Tepe, Turkey. *Geoarchaeology*, 24 (2), 176–190. doi:10.1002/gea.20261

Topography of Hacituğrul Tepe

- 4 days by 2 operators (ca. 1km²)
- DEM resolution: 4 m
- Contour interval: 0.5 m
- Accuracy: ~1 m



LRF + DGNSS + APSD なんちゃってレーザスキャナ

Laser range finder (TruPulse)

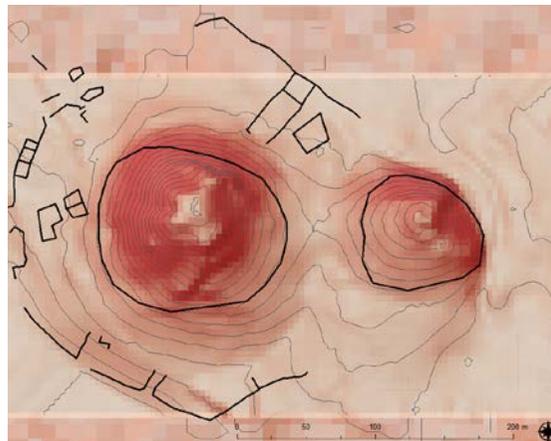
+

Automatic panorama shooting device (GigaPan)



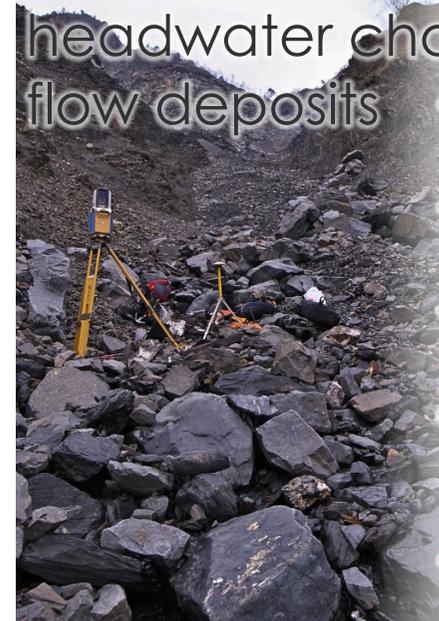
Result at Ikitepe

- 1 person
- 2.5 hours
- 350 m x 200 m
- 4-m DEM

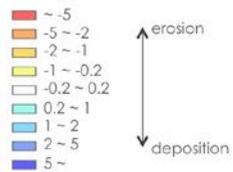


Hayakawa, Y.S., Kontani, R., Kulakoğlu, F., Ezer, S., Öztürk, G. (2012) A quasi laser scanning system using laser range finder and automatic panorama shooting device. *CSIS Discussion Paper*, 113, 1-9.

地形変化：TLS & GNSS in steep headwater channel for debris flow deposits



- GLS-1500 by Topcon Co., Tokyo
- accuracies
 - distance: 4 mm @ 150 m
- maximum distance
 - **500 m** (90% reflectance)
- weight
 - 16 kg (body) + battery, tripod, pc, etc. (**30-40 kg**)
- **GCPs by PPK-GNSS**

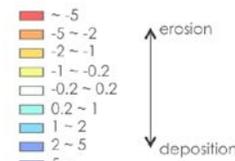
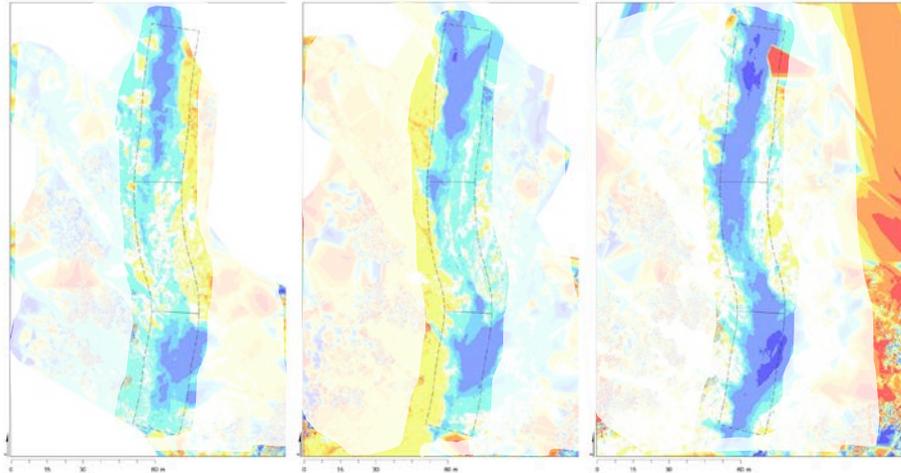


deposition in winter → spring for three years

May 2012 - Nov 2011

May 2013 - Nov 2012

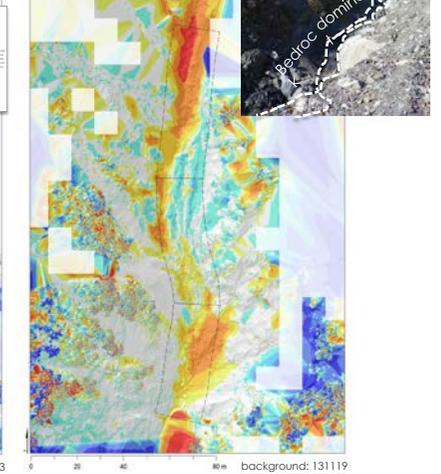
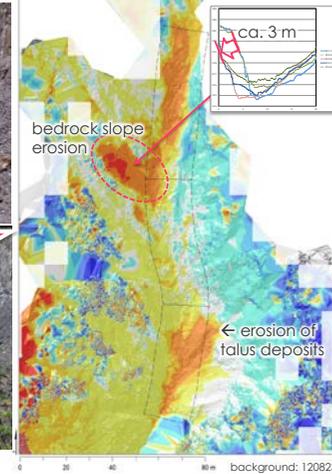
May 2014 - Nov 2013



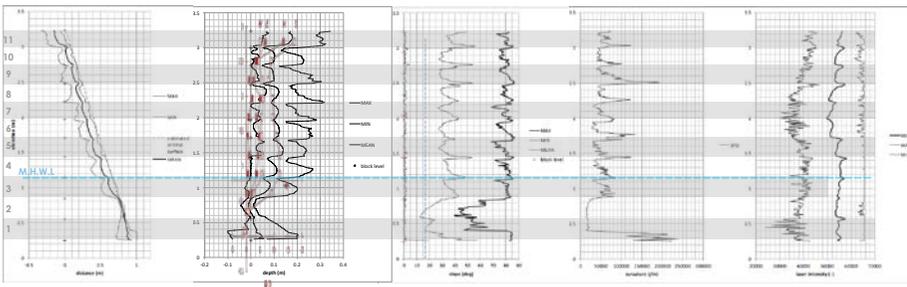
erosion in summer mostly by debris flows

2012.05 → 2012.08

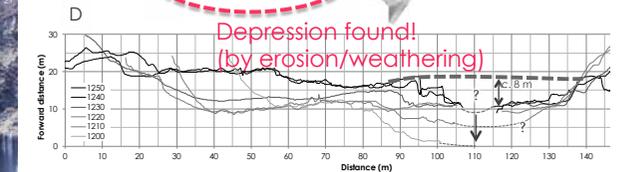
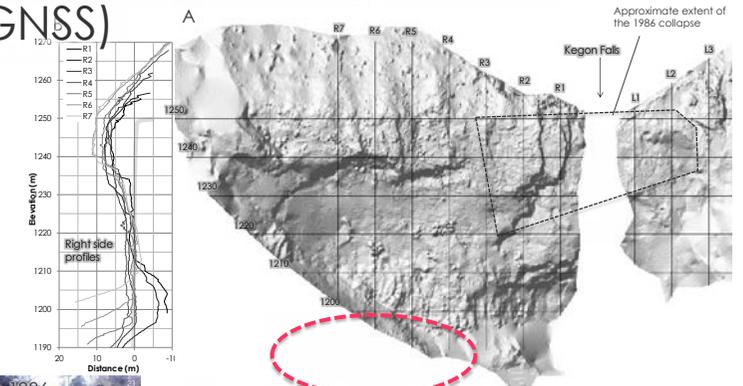
2013.08 → 2013.11



rock weathering – TLS only



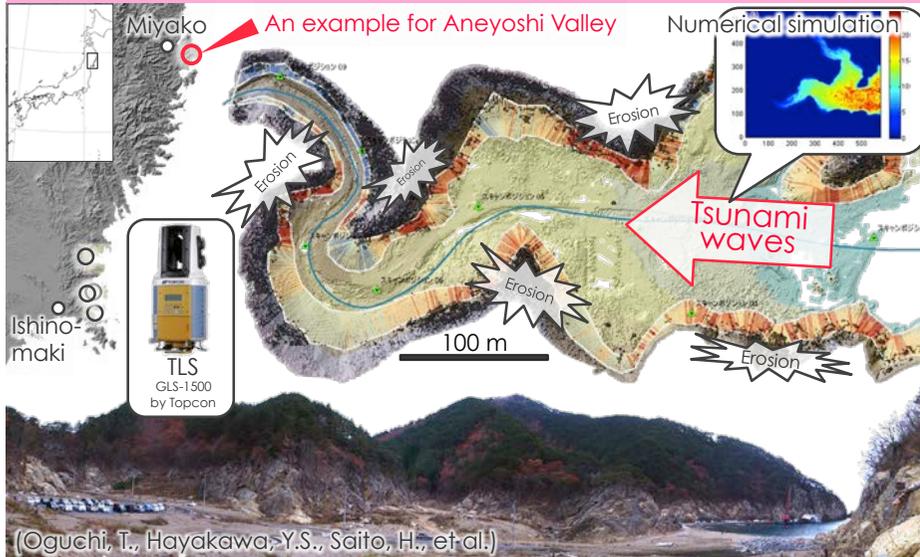
waterfall cliff face at Kegon Falls – TLS (+GNSS)



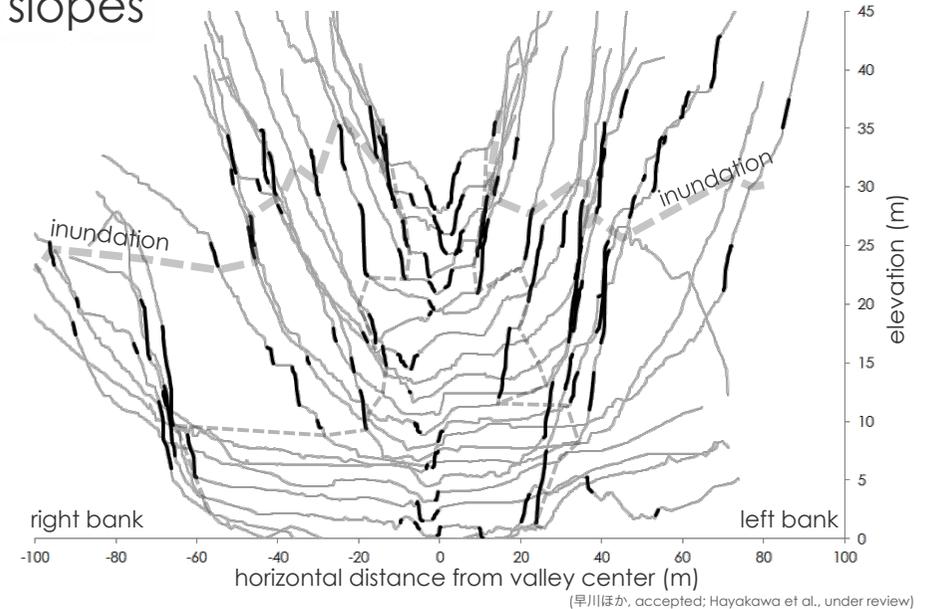
Hayakawa, Y.S. (2013) Stability analysis of cliff face around Kegon Falls in Nikko, eastern Japan: an implication to its erosional mechanisms. *International Journal of Geosciences*, 4 (6A2), 8–16. doi:10.4236/ijg.2013.46A2002

3-D laser scanning of valleys along Sanriku Coast: Morphological characteristics of repeated tsunami erosion

Morphology of slopes in a coastal valley, where tsunami waves can readily flow in, were measured using a TLS. Our analyses revealed erosional features by repeated tsunami waves in the Holocene.



extraction of **small cliffs** on valley-side slopes



結局どの手法が適しているのか？

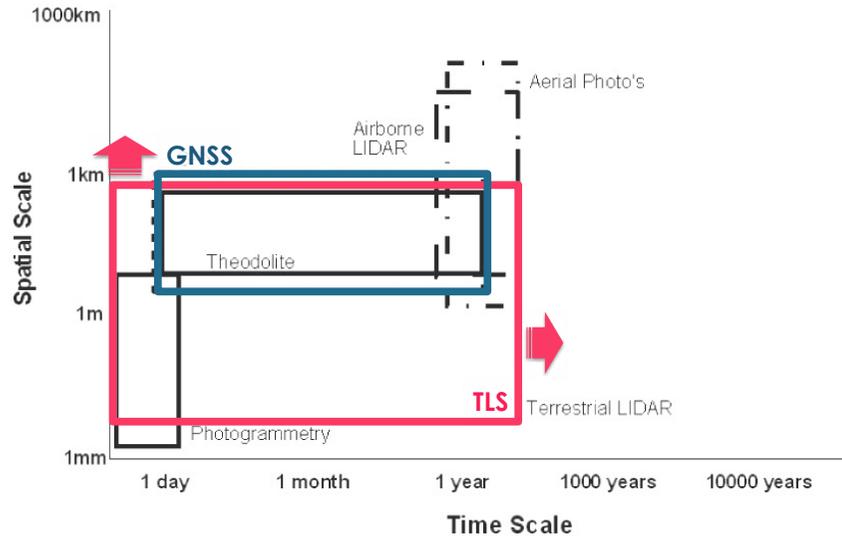
- 一次的な簡易地形図作成
 - DGNSSのみ
 - LRFのみ
 - DGNSS + LRF
- 詳細・正確な地形図作成
 - RTK- or PPK-GNSS
 - DGNSS + TLS
- 地形変化の抽出
 - RTK- or PPK-GNSS + TLS: “位置合わせ”

summary

	GNSS	LRF (+ GNSS)	TLS (+ GNSS)
time on site	★ 1- hours	★★ 0.5-1 hour	★ several hours (multiple scan)
time for post processing	★★★ 1 hour	★★ 2- hours	★ several hours
area	★ 10-100 m	★★ 1000 m	★★ 1000 m
cost	★★ JPY 100k-1M	★★★ JPY 100k-200k	⊕ JPY 5M-30M
resolution & representation	★ 1-10 m	★★ 1-10 m	★★★★★ 1-10 mm
relative accuracy	★★ 1-10 cm	★ 10 cm - 1 m	★★★ 2-3 mm
visibility (RGB)	⊕ N/A	⊕ N/A	★★ RGB point cloud

- GNSS alone gives less resolution
- combination of LRF/TLS & GNSS is standard
- LRF or TLS accuracy (global) relies on GNSS (GCPs)

spatial & time scales by GNSS & TLS



extents of temporal and spatial scales covered by each measurement method (after Heritage and Hetherington, 2007)

spatial resolution (accuracy) & area

