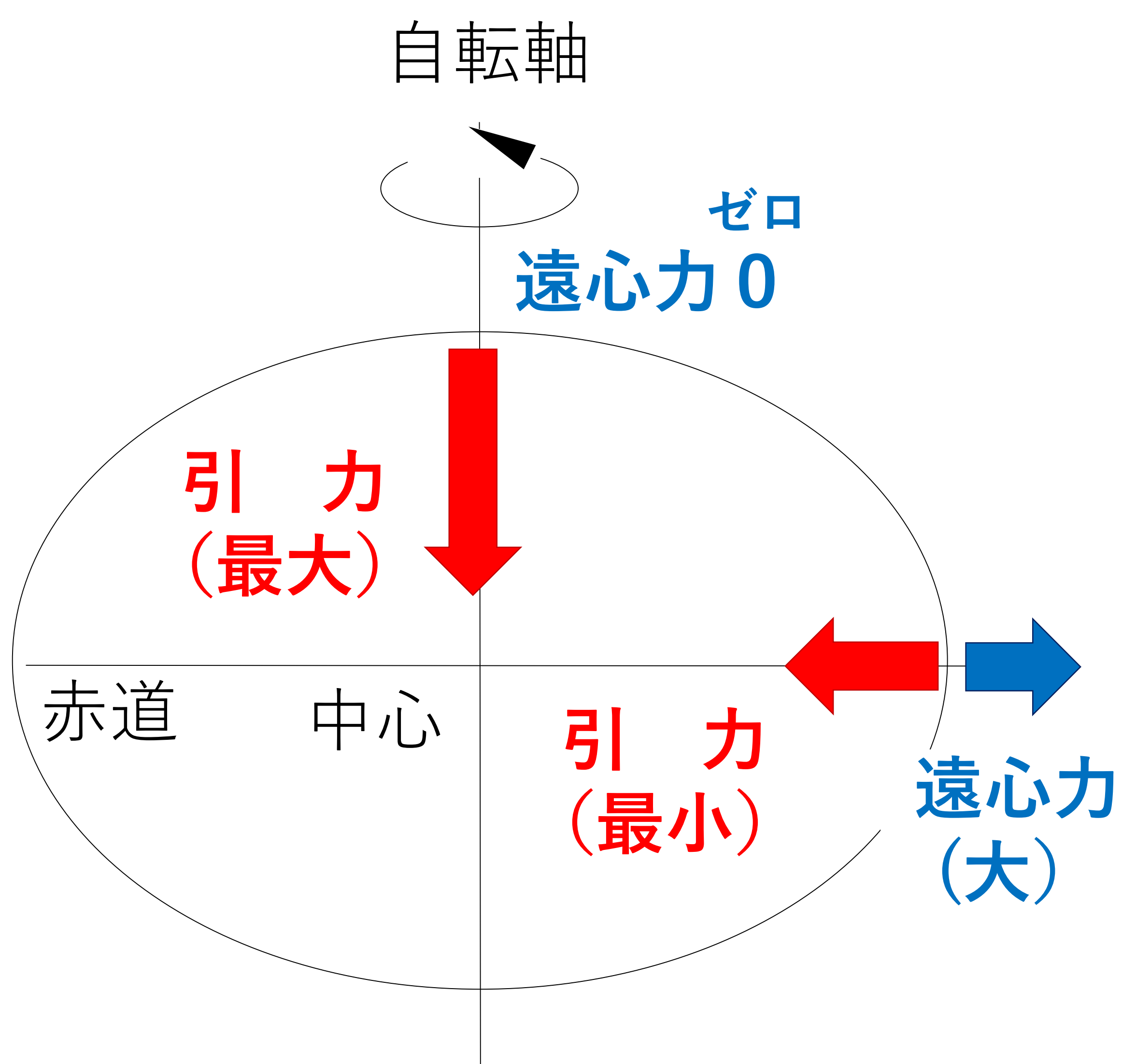


重力の性質

重力の性質 その1

北極や南極に近づくほど重力加速度が大きくなり、赤道に近づくほど重力加速度が小さくなります。



重力は、引力と遠心力の合力です。
赤道では北極や南極よりも約0.5%小さくなります。

北極・南極

ゼロ

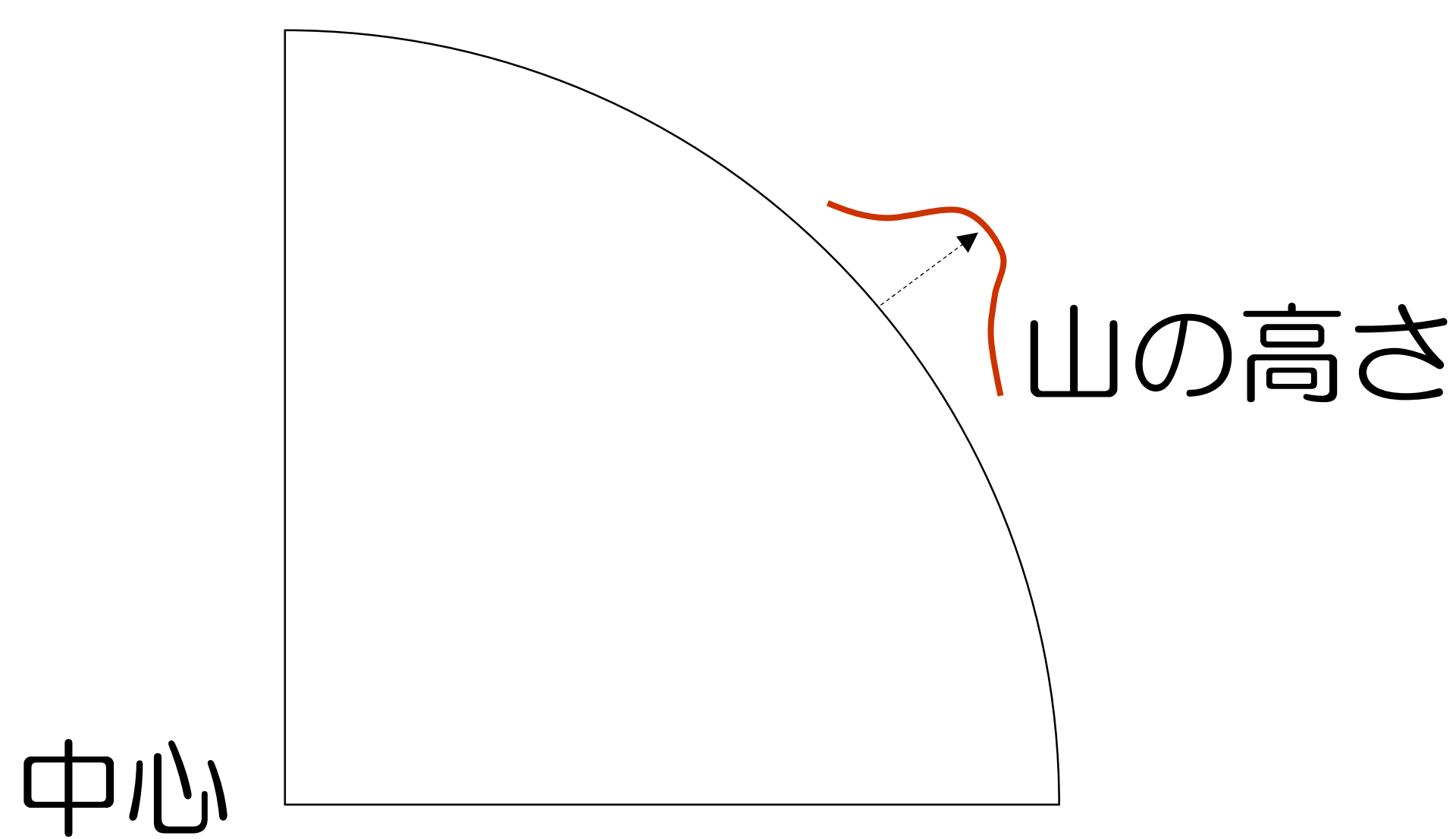
引力（大）－遠心力〇＝重力加速度（大）

赤道

引力（小）－遠心力（大）＝重力加速度（小）

重力の性質 その2

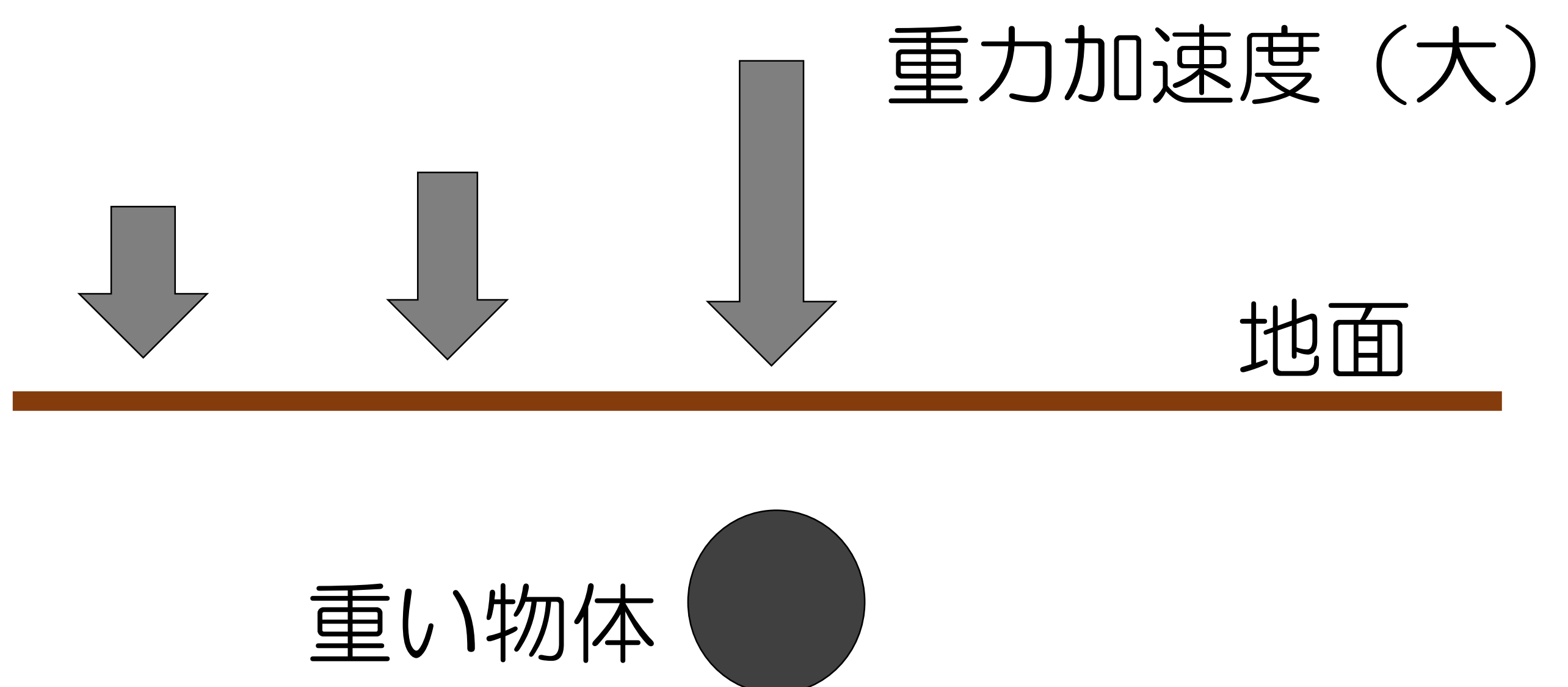
標高が高いところほど重力加速度が小さくなります。



山の高さだけ地球の中心から遠ざかるため引力が小さくなり、重力加速度も小さくなります。
富士山の重力は、麓の三保の松原よりも0.09%小さくなります。

重力の性質 その3

地下に重い物体があると重力加速度が大きくなります。



地下にある重い物体は引力が強く働き、真上の地上では重力加速度が大きくなります。

各地の重力

北海道札幌と沖縄石垣島、富士山頂の重力加速度は？



札幌



石垣島



富士山頂

重力点「札幌」：北海道大学構内

緯度	経度	標高	重力値
43° 04′ 20″ .15	141° 20′ 29″.66	15.21 m	980477.54 mGal

重力点「石垣島」：石垣島気象台

緯度	経度	標高	重力値
24° 20′ 11″.90	124° 09′ 52″.76	6.68 m	979006.04 mGal

三角点「富士山」

緯度	経度	標高	重力値
35° 21′ 38″.2608	138° 43′ 38″.5153	3775.51 m	978865.4 mGal

※東京大学地震研究所による測定結果（大久保ほか, 2004）

重力加速度は北が大きく南は小さいことが分かります。また、富士山頂は、石垣島よりも緯度が約11度も北なのに、標高が高いことから重力加速度が小さいということが分かります。

重力値によるはかりの校正

重力値の違いによる体重の変化

体重計の地域設定を茨城県として同じ人が同じ体重計を用いて各地ではかった場合の体重の表示の変化

地 域	体重計表示 [kg]	増減 [kg]	重力加速度 [m/s ²]
北海道（稚内）	60.04	+0.04	9.806
茨城県	60.00	—	9.800
沖縄県	59.94	-0.06	9.791

デジタル体重計には、正確にはかるためにお住まいの地域を設定して、各地の重力加速度を用いて影響を取り除くものがあります。

体重計を新しく購入されたときや、遠くに引っ越されたときには、お住まいの地域を正しく設定して使いましょう。

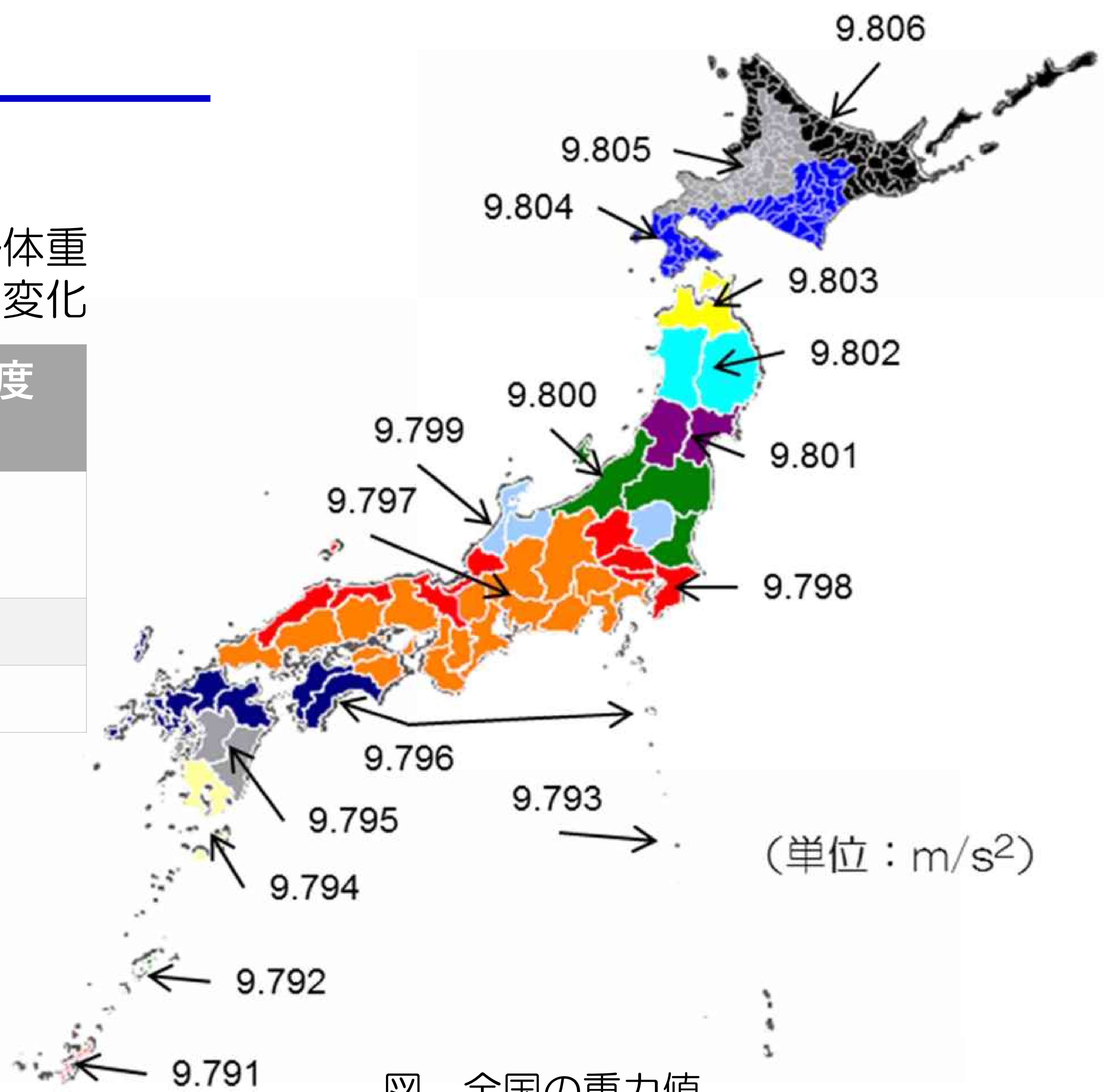


図 全国の重力値

重力加速度を測る

■絶対重力測定

絶対重力測定は、ある地点の重力加速度を測る測量です。真空中を落下する物体の位置の変化を、レーザーと原子時計で正確に測り、重力加速度を求めます。

右の写真は、国際比較観測に参加した絶対重力計を基準として、国土地理院や研究機関等の国内の絶対重力計を比較観測している様子です。国際比較観測の結果と合っているかどうかを確認しています。



絶対重力測定（F G 5 絶対重力計）

■相対重力測定

相対重力測定は、2点間の重力加速度の差を測る測量です。ばねに吊り下げたおもりは、その場所の重力加速度によってばねが伸びます。違う場所に移動し、重力加速度が異なると、ばねが伸びる長さが変わるため、その差を測ることで、重力加速度の差を求めます。

右の写真は、測定の様子です。写真の重力計は、ラコスト重力計と呼ばれるもので、器械の中をのぞき込んで測定します。



相対重力測定（ラコスト重力計）

■航空重力測量

航空重力測量は、航空機に重力計を搭載し、上空から重力を測定する測量（相対重力測定）です。地上で行う重力測量と比べて、広範囲を効率的に測量できます。また、山岳部や沿岸域など、地上での測定が困難な場所でも測量できます。

国土地理院では、令和元年度から令和5年度まで航空重力測量を行い、取得した重力データのほか、様々な重力データを使用して、高精度な重力ジオイド・モデルを構築します。



航空重力測量の様子

絶対重力測定

絶対重力計 FG5 （1993年～現在）

絶対重力測定とは、重力の絶対値を求める方法です。

真空中で物体を静かに落とすと、物体は地球の重力に従って自由落下します。この自由落下運動をたくさん観測することで、精度よく重力値を求めることができます。

国土地理院は、特殊な鏡を落下させる絶対重力計FG5を使用して、日本の重力の基準を整備しています。このほか、原子を落下させる量子型絶対重力計AQGを所有しています。



絶対重力計FG5



量子型絶対重力計AQG

重力値の単位

これらの絶対重力計は、 $1 \mu\text{Gal}$ （マイクロガル）単位で重力値を計測できます。地上における平均的な重力値は概ね 980 Gal ですので、地上の重力値の約 10 億分の 1 というわずかな量を測定できることになります。

$$\begin{array}{cccccccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ 9.80000000 & \color{red}{0} & \text{m/s}^2 & = & 980000000 & \color{red}{0} & \mu\text{Gal} \\ \uparrow & & & & & & \uparrow & & & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & \text{この値まで測定しています。} & & & & & & & & & & & & & \end{array}$$

計測した重力値の各桁から読み取れる地球物理に関する情報は、おおよそ以下のとおりです。

- 3, 4 桁目 緯度で決まる。時間的变化はない。
- 5 桁目 地下の構造に関する情報が分かりはじめる。
- 7 桁目 測定する高さを 1m 高くすると、約 3 程度減少する。
月や太陽の引力による潮汐の効果が見えはじめる。
- 8 桁目 地殻変動、地下水移動や火山活動に伴うマグマの移動等の影響が分かりはじめる。

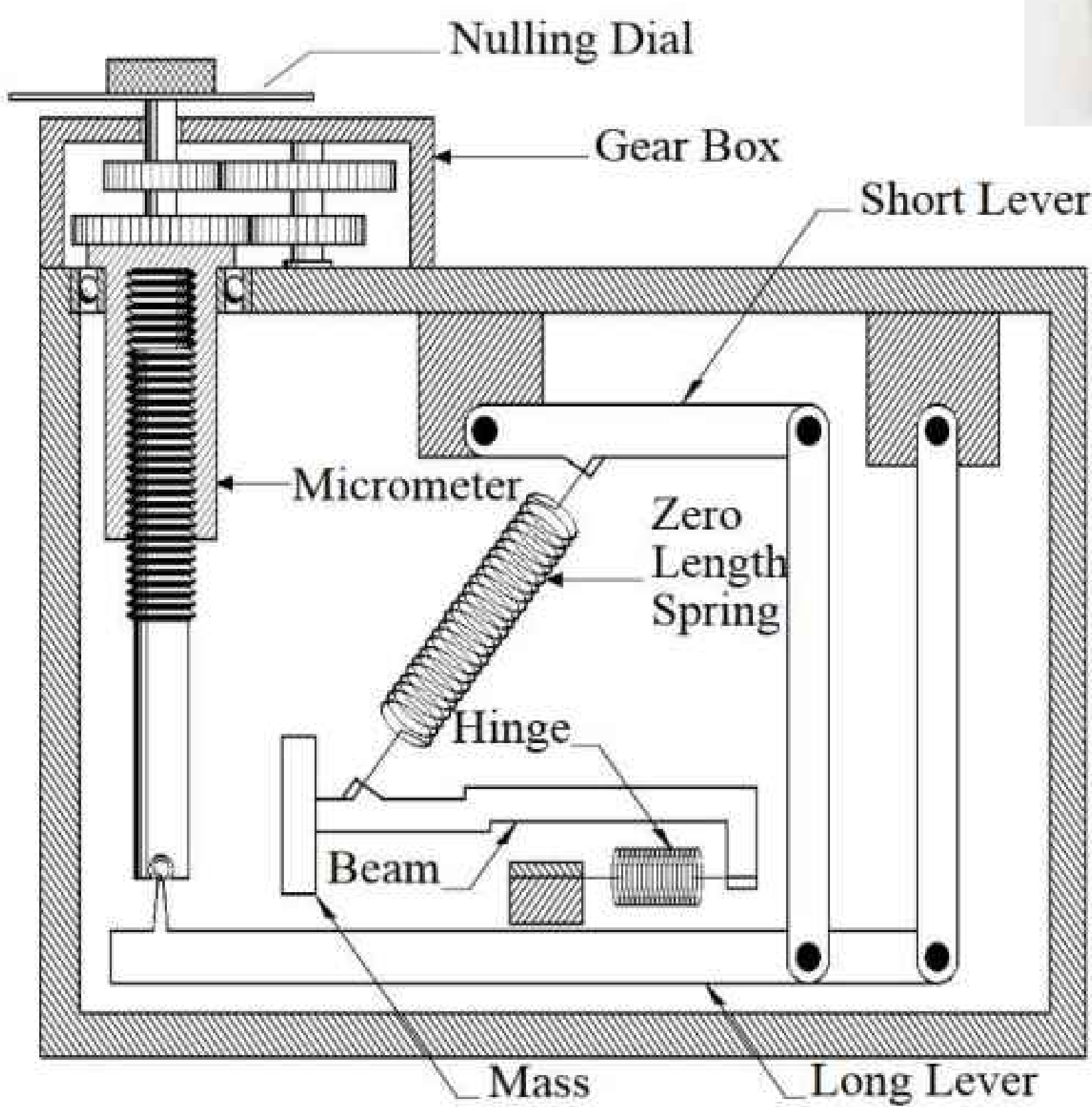
相対重力測定

ラコスト重力計 G型（1962年～現在）

1962年から国土地理院に導入され、現在も現役で使用されているとても優秀な相対重力計です。名前は“はじめの長さゼロのバネ”を考案したLaCoste氏に由来します。“はじめの長さゼロのバネ”とは、重りを吊っていない状態でも、バネ自体が常に縮もうとする力が働いている特殊なバネになります。

このバネを用い、固有周期を長くかつ測定感度を高くするように重りを吊ることで、細かな数値で重力の変化量を測定することが可能となっています。

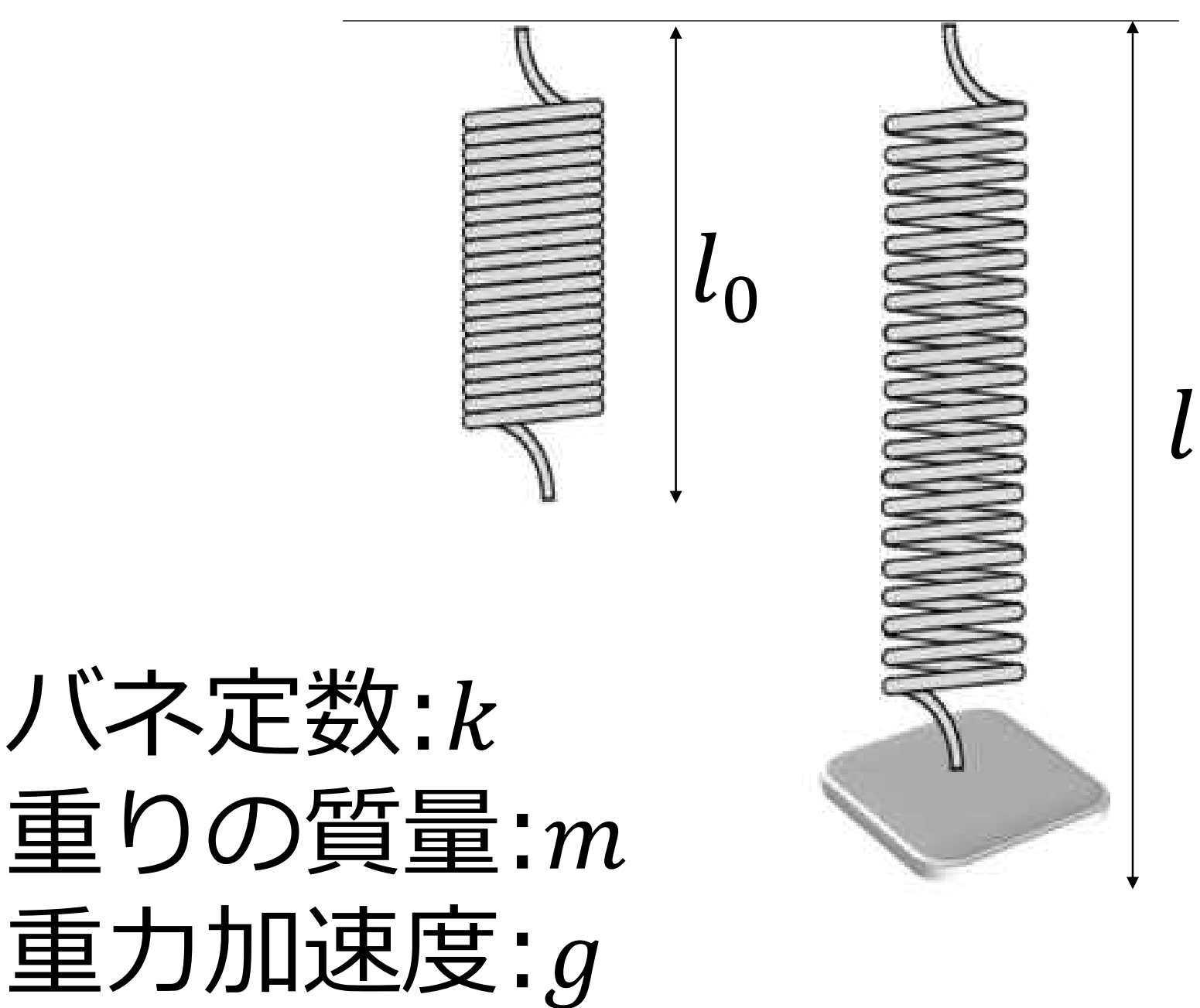
測定方法は、重力により上下する重りを、ダイヤルでその位置が一定になるように調整します。その調整量が重力に比例することを利用して重力の変化を測定します。



2004 LaCoste & Romberg



読み取り値	1 μGal
測定精度	10 ~ 20 μGal
設定温度[°C]	0 to +45
DC電源	○
AC電源	○
屋外使用	可
測定方法	手動
仕様	

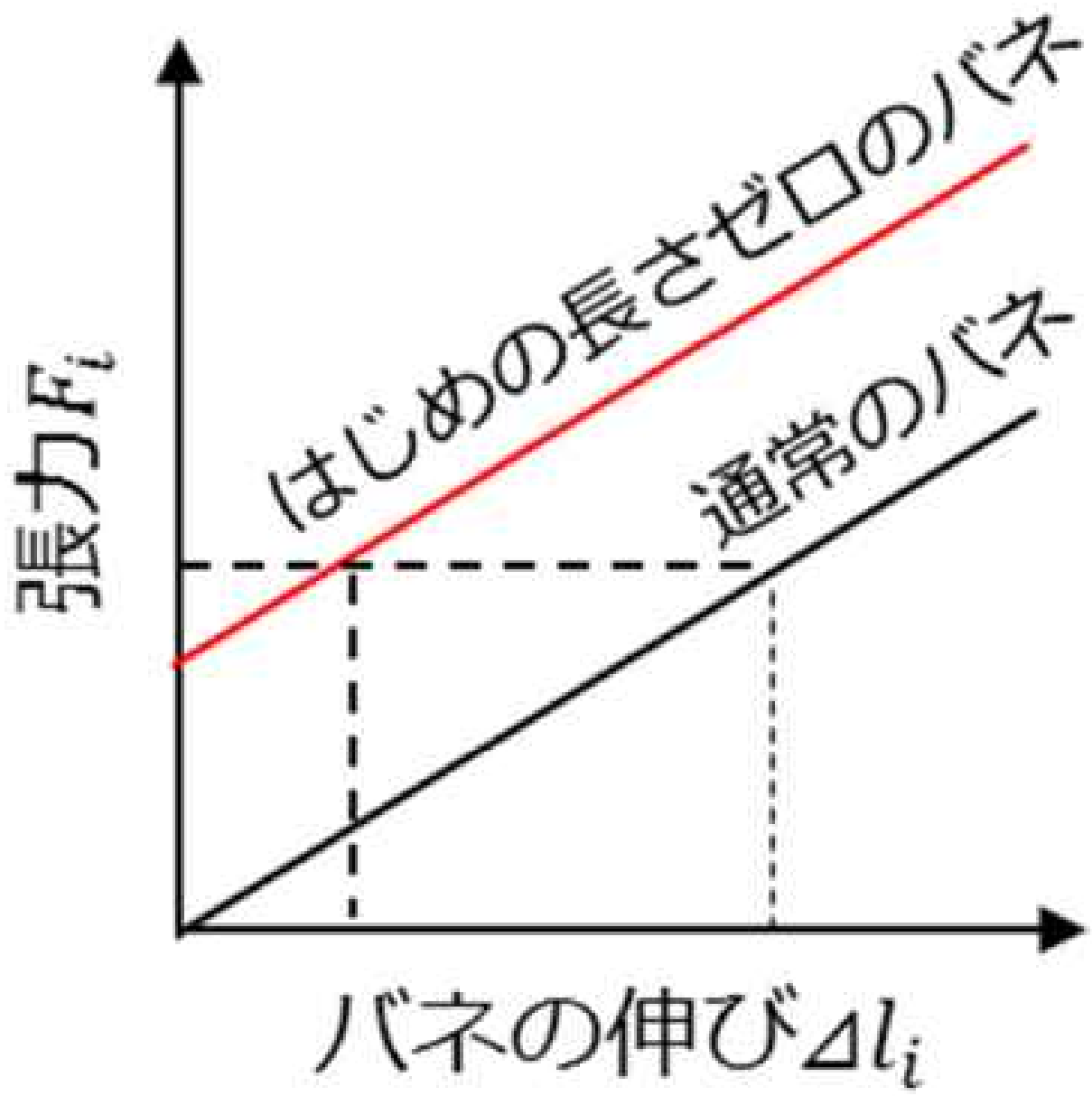


通常バネの張力と重力の関係

$$F = k(l - l_0) = mg$$

はじめの長さゼロのバネの張力と重力の関係

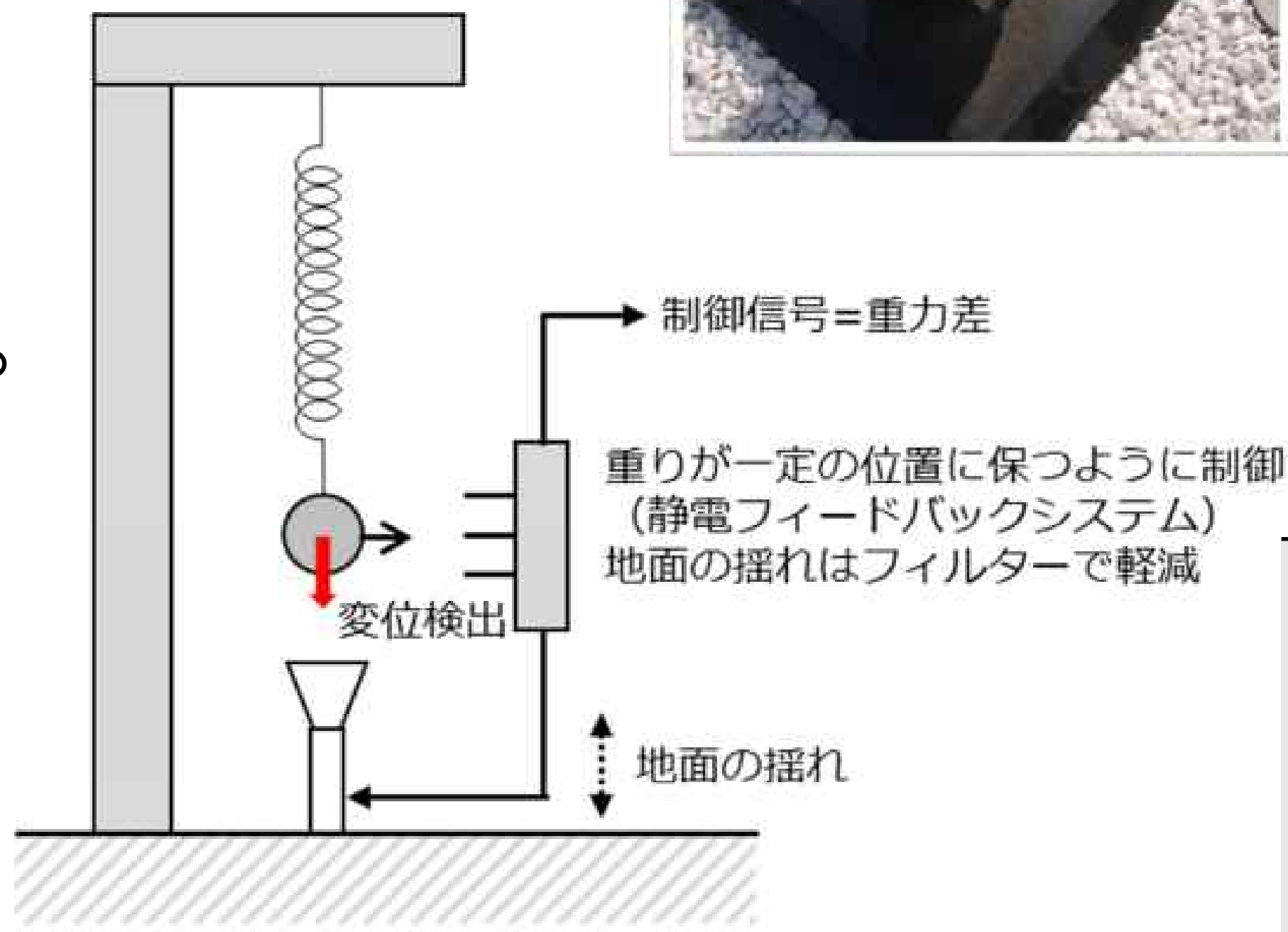
$$F = kl = mg$$



シントレックス重力計CG5（2006年～現在）

2006年から国土地理院に導入された相対重力計で、メニュー画面にしたがって、容易に連続観測を自動で行うことができます。南極での屋外観測で使用しています。

その動作原理はフックの法則を適用しています。バネに吊るした重りの変位をセンサーで検知しつつ、静電フィードバックシステムによって、一定の位置に保つように制御します。このフィードバック電圧をデジタル信号にして記録し、重力変化を測定しています。



シントレックス重力計CG5の特徴



南極での観測

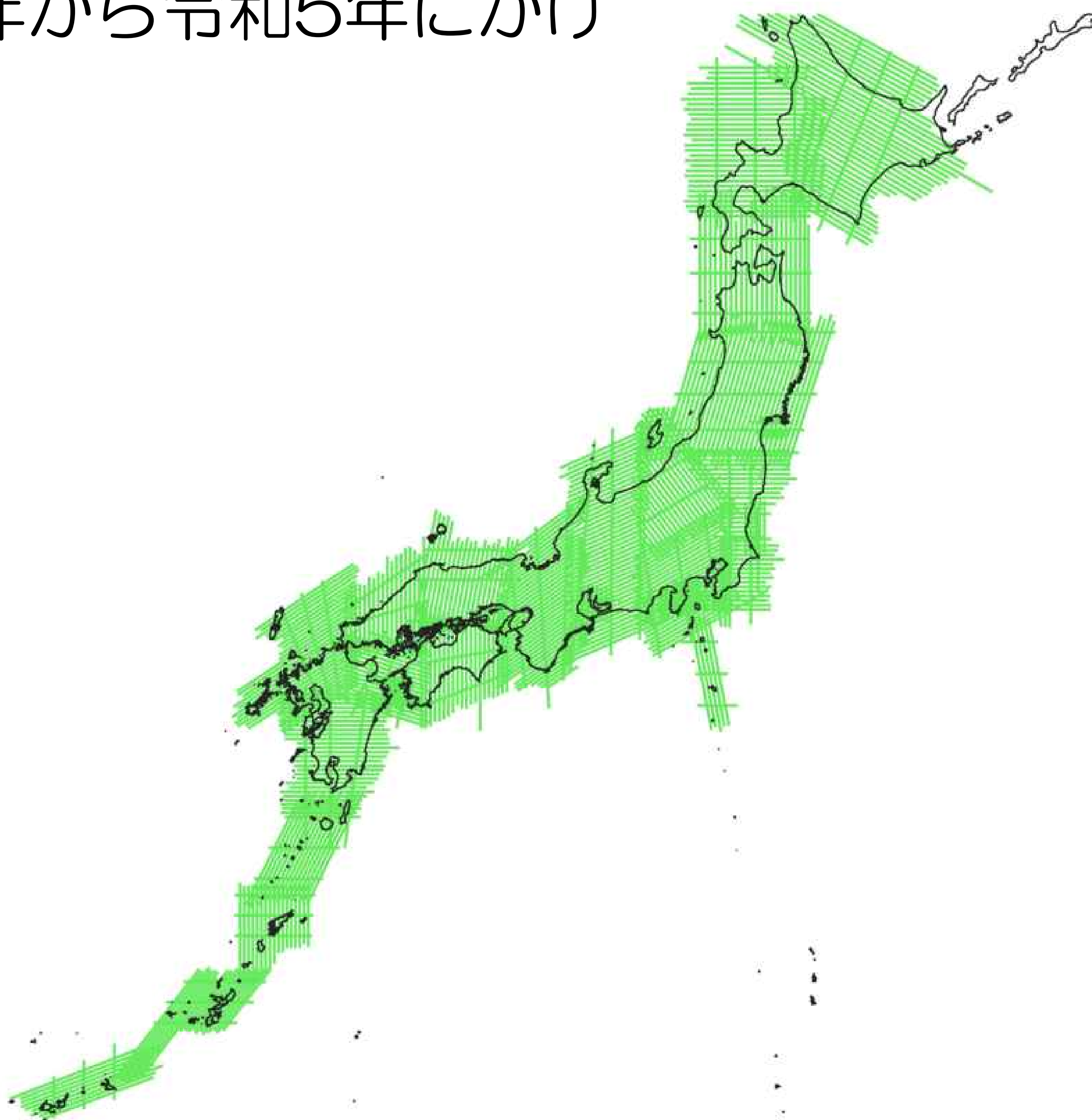
読み取り値	1 μGal
測定精度	< 5 μGal
設定温度[°C]	-40 to +45
DC電源	○
AC電源	○
屋外使用	可
測定方法	自動
仕様	

航空重力測量

国土地理院は、高品質な重力データを効率的に整備し、水準測量の誤差が内在しない、重力データのみを使用したジオイド・モデルを作成するため、航空重力測量を令和元年から令和5年にかけて実施しました。

航空重力測量観測実績 観測測線

総飛行距離 | 13.9万km
総測線数 | 598本
総飛行時間 | 1,316時間



航空機 Textron Aviation 208
(民間機をチャーターして使用)



上空における航空機内の様子

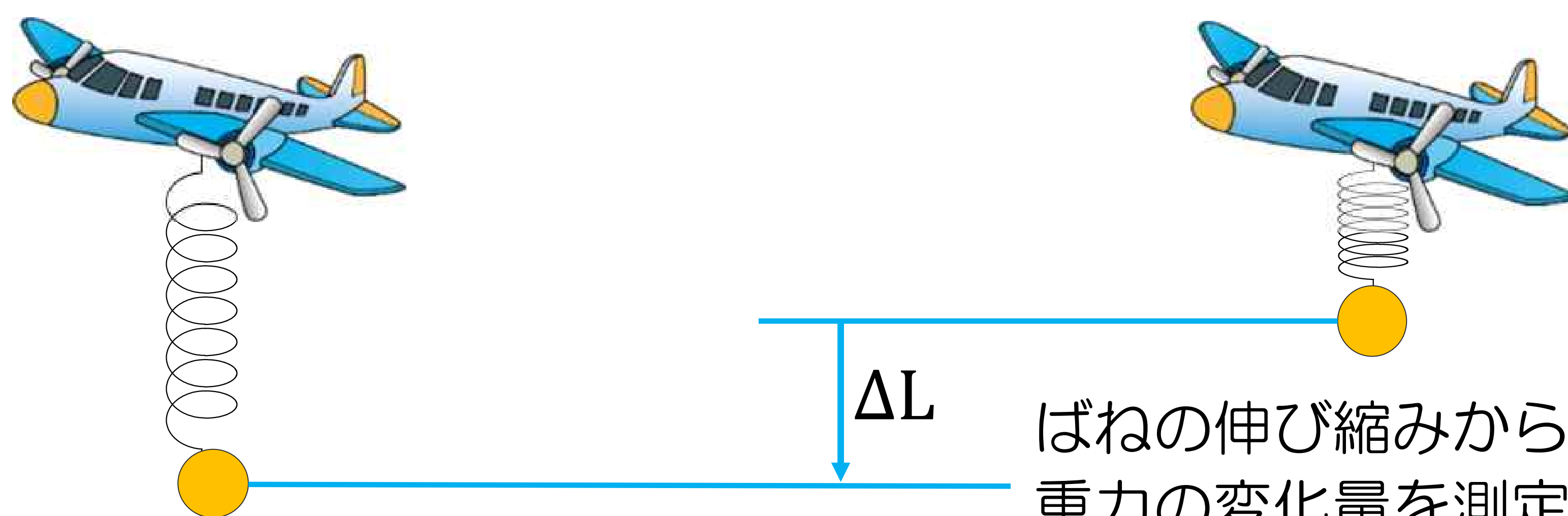


航空重力計 (TAGS-7)
航空重力計 (TAGS-7)

航空機から重力を測る仕組み

重力値は、地形や地下構造などの影響により、測る場所によって変わります。航空重力測量では、航空機に専用の相対重力計（航空重力計）を搭載し、バネの伸びから、各地点の重力値を測定します。ジャイロや加速度計で自動的にセンサー部の水平を保つほか、ダンパー等で機体の振動から守ります。

さらに、GNSS/IMU装置を別途搭載し、機体の上下運動や回転運動に伴うノイズを補正することで、観測データから高精度な重力値の算出が可能となります。



$$\Delta g = k * \Delta L / m$$

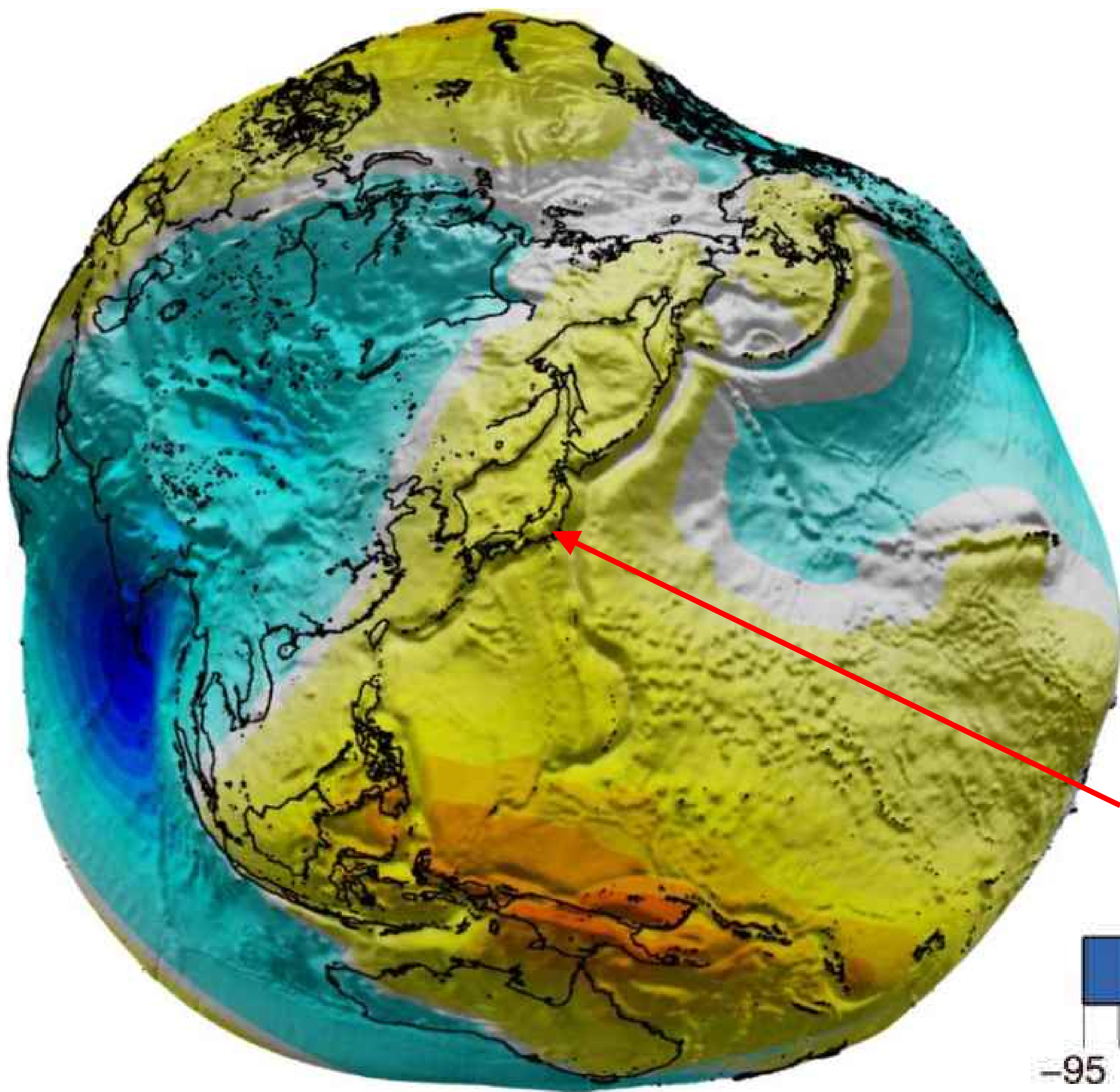
バネ定数: k
重りの質量: m

航空重力測量の測定イメージ

GNSS/IMU装置は、GPSやみちびきなどの測位衛星からの電波を受信して航空機の位置（緯度・経度・楕円体高）を測定する機器と、加速度センサー、ジャイロスコープからなるIMU（慣性計測装置）で航空機の加速度、姿勢を測定する機器のこと。

ジオイドを地球規模でみる

■地球のジオイドは凸凹



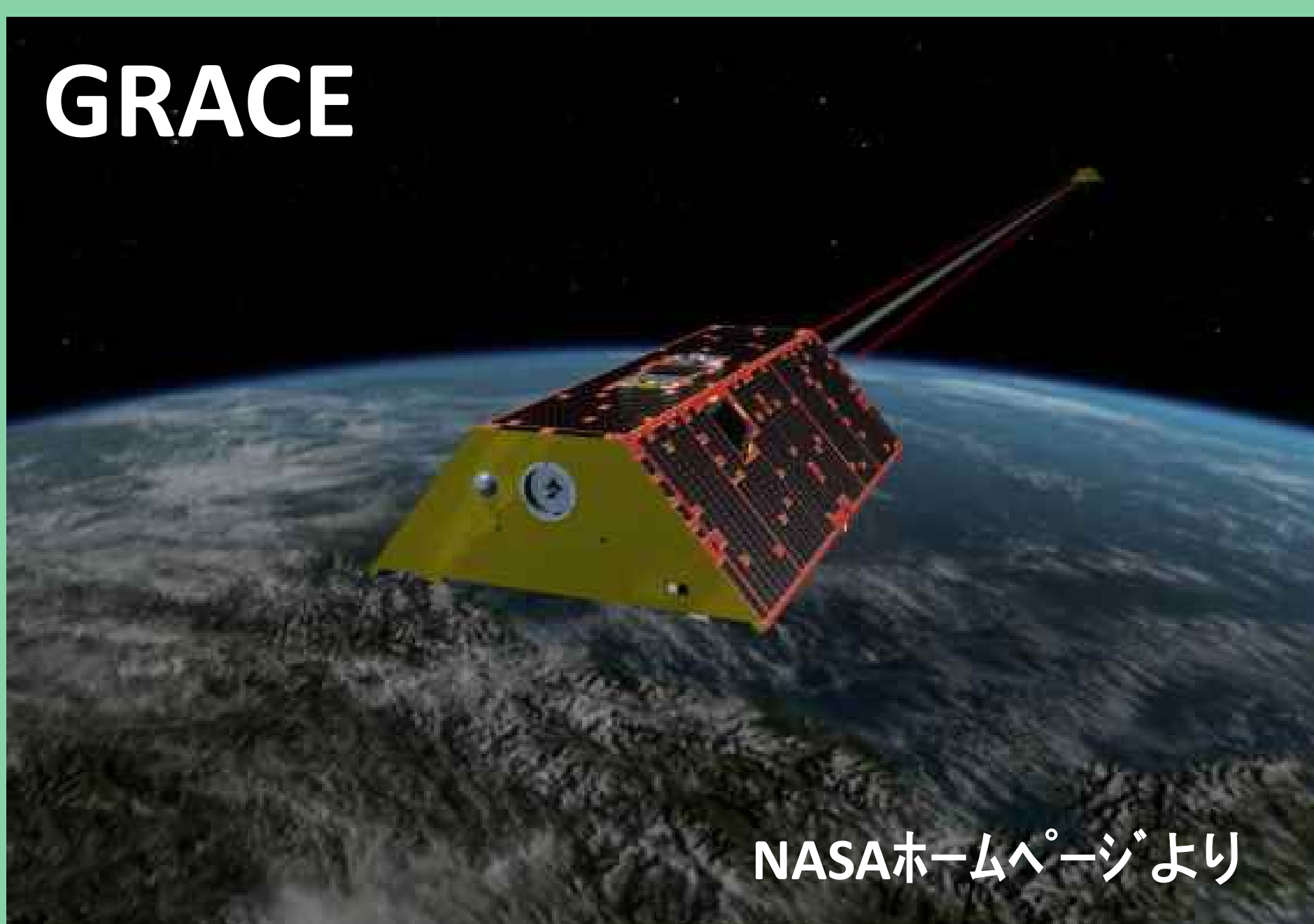
画像は、水平方向に対して鉛直方向を1万倍に誇張して描画したジオイド

■人工衛星による重力測定

米国やヨーロッパを中心に、人工衛星で重力を測る取組が進められています。

衛星重力ミッション

GRACE



NASAホームページより

同一軌道を周回する2つの衛星の間の距離の変化や軌道の変化から重力を求めます。

GOCE



欧州宇宙機関(ESA)ホームページより

搭載した加速度センサーや軌道の変化から重力を求めます。

人工衛星アルチメトリー

Jason-3



NASAホームページより

地球に向けて電波を照射し、海面で反射した電波を受信して海面高（ジオイド）を求めます。

関東大震災（1） 地殻変動を捉えた陸地測量部の測量

「1923年（大正12年）9月1日11時58分に、相模湾北西部を震源とするマグニチュード7.9と推定される大正関東地震（この地震によって生じた災害は「関東大震災」と呼ばれています。）が発生しました。地震により、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、山梨県で震度6を観測したほか、北海道道南から中国・四国地方にかけての広い範囲で震度5から震度1を観測し、10万棟を超える家屋を倒潰させました。また、発生が昼食の時間と重なったことから、多くの火災が発生しました。この地震によって全半潰・消失・流出・埋没の被害を受けた住家は総計37万棟にのぼり、死者・行方不明者は約10万5千人に及ぶなど、甚大な被害をもたらしました。」（出典：内閣府「関東大震災100年」特設ページ、気象庁「関東大震災から100年」特設サイト）

参謀本部陸地測量部は、水準測量で微細な地殻変動を捉えるために余震が沈静してきた9月26日から房総半島や三浦半島、10月下旬から東京付近の水準点の検測を始めています。翌年の3月には水準点231点、延長460kmの検測が終わり3月に報告されています。この報告により水準原点の沈下を含め路線上の水準点の隆起と沈下の概要が分かりました。（報告書は「関東地方激震後二於ル震災地一等水準線路ノ変動二就テ」1924年(大正13年)3月報告）

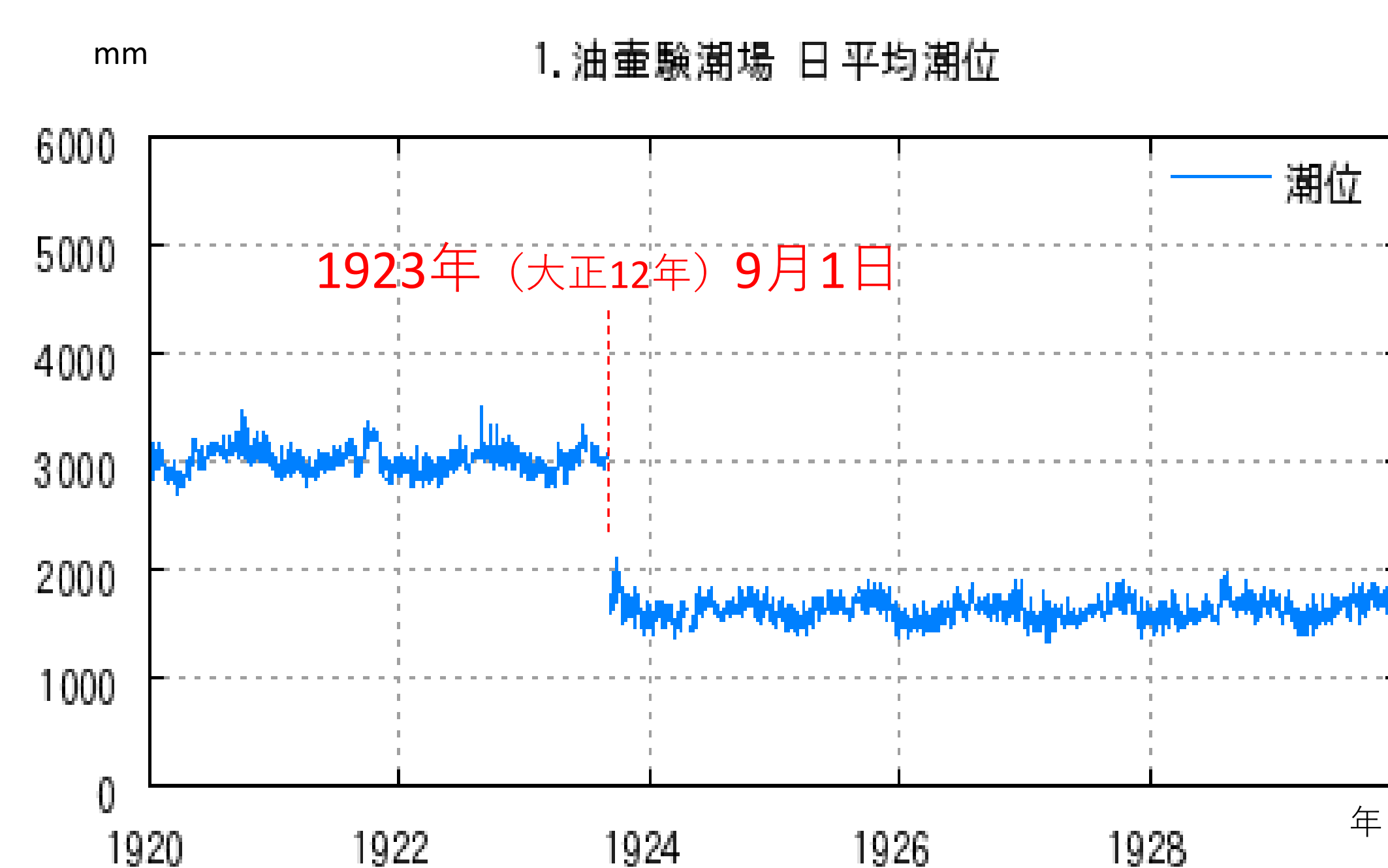
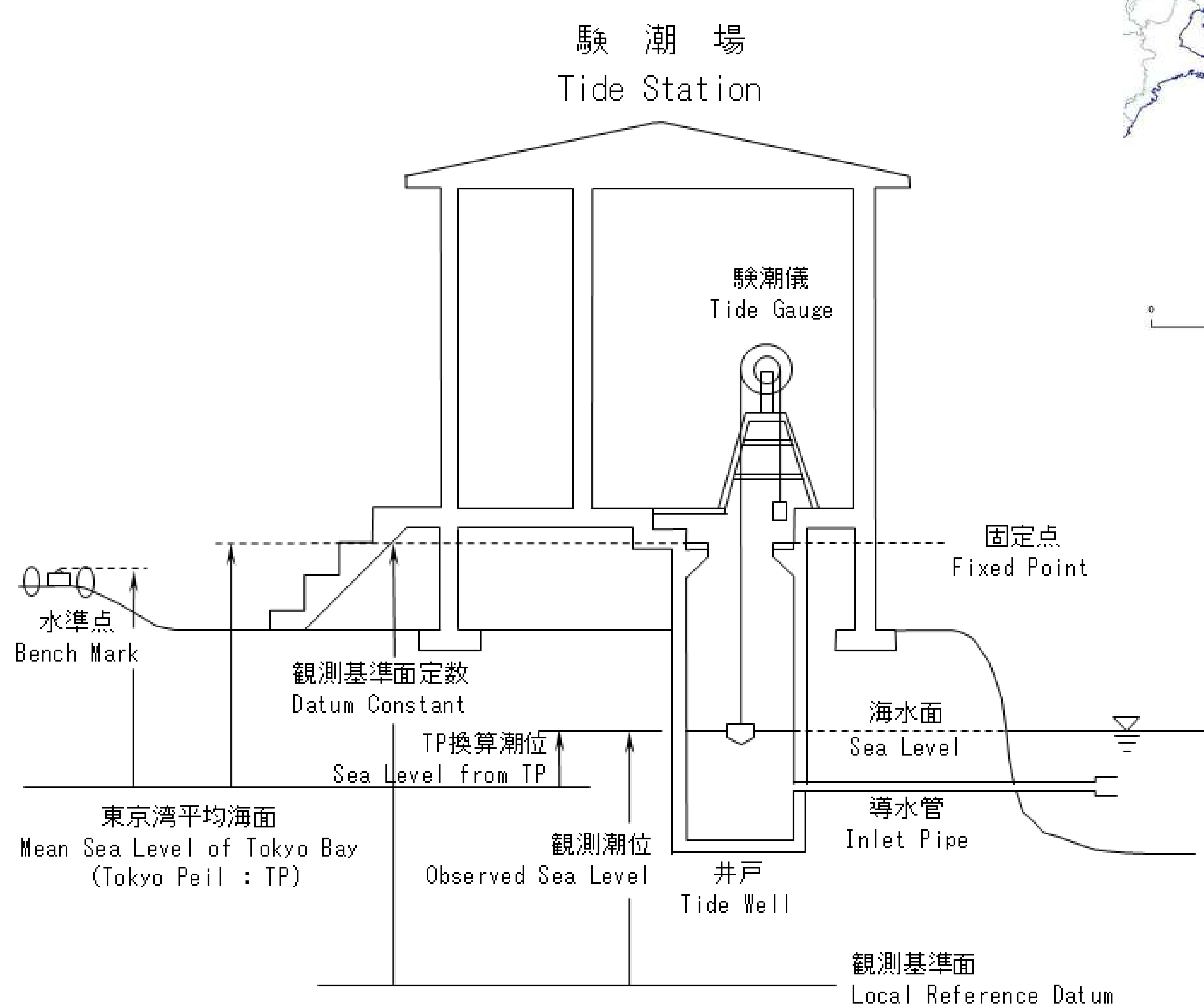
この詳細な地殻変動を捉え、水準点・三角点の成果の改定や測量標の復旧のために、1924年(大正13年)に関東震災地復旧測量要領を定め、5月から東京府、神奈川県、千葉県、埼玉県、群馬県、栃木県、茨城県、山梨県、長野県、静岡県の1府9県の東西約255km南北約200kmの広域にわたり水準測量、基線測量及び三角測量を実施しています。

日付	元号	測量	測量内容等
1923年9月1日	大正12年		地震発生 午前11時58分
1923年9月1日	大正12年	験潮	油壺験潮場の験潮儀の時計装置破損
1923年9月4日	大正12年	験潮	油壺験潮場の験潮儀が復旧
1923年9月26日	大正12年	水準	房総半島、三浦半島に水準測量班派遣
1923年10月下旬	大正12年	水準	東京及びその周辺に水準測量班派遣
1924年3月中旬	大正13年	水準	相模湾、東京湾、房総半島などの沿岸部の水準測量が終了
1924年3月	大正13年	水準	「関東地方激震後二於ル震災地一等水準線路ノ変動二就テ」を報告
1924年5月下旬	大正13年	基線	相模の基線網の造標作業開始
1924年5月22日	大正13年	基線	相模基線測量の開始
1924年6月中旬	大正13年	三角	二等・三等三角点観測開始
1924年7月上旬	大正13年	三角	一等三角点改測開始（12点）
1924年7月20日	大正13年	基線	相模基線測量の終了
1924年11月	大正13年	水準	「陸地の水準変更」について報告
1924年12月19日	大正13年	三角	一等三角改測終了（12点）
1925年12月	大正14年	水準	「関東震災地一帯二於ケル土地ノ隆起及沈下状態」を報告
1925年度	大正14年	三角	一等三角補点の観測終了（20点）
1926年11月上旬	大正15年	三角	二等・三等三角点観測終了（二等138点、三等673点）
1927年3月下旬	昭和2年	水準	水準測量作業終了
1928年5月	昭和3年	水準	「水準原点真高改訂之図解」を報告
1929年1月	昭和4年	水準	「水準点真高ノ改訂二就テ」（英文）を報告
1930年1月	昭和5年	水準	「関東震災地一等水準点比較変動図」を報告

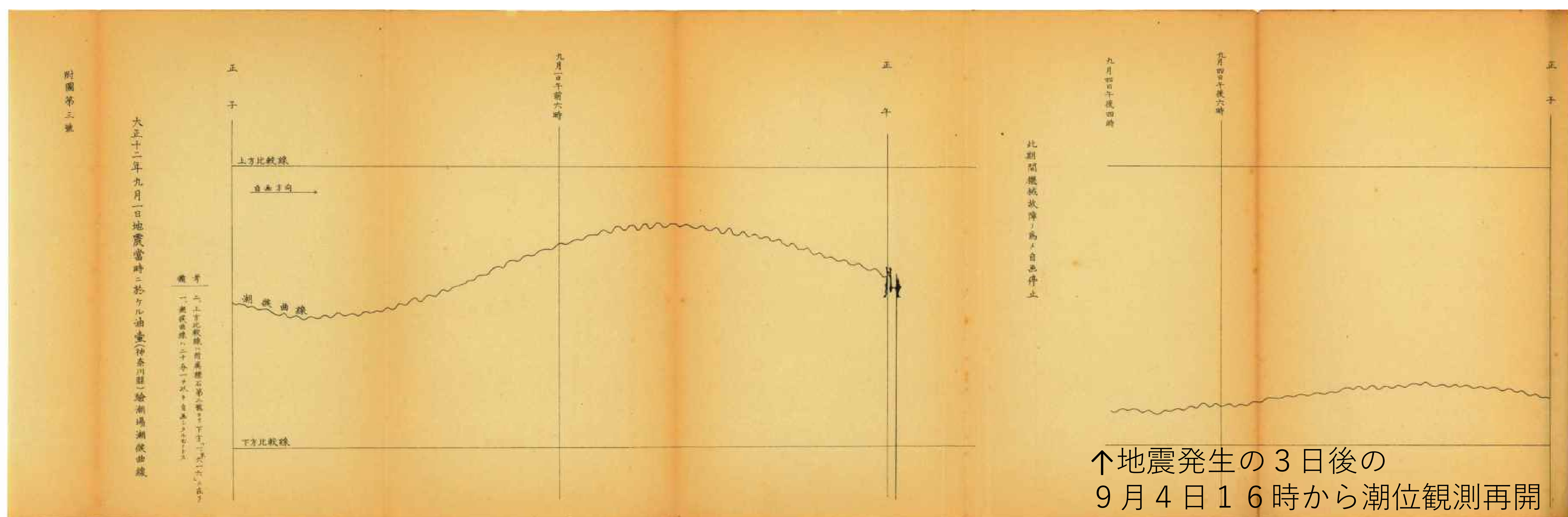
関東大震災（2） 地震時に記録された潮位

1923年(大正12年)9月1日の大正関東地震により、油壺験潮場は験潮儀の時計が破損し欠測しましたが、3日後の9月4日に復旧しています。

この地震で油壺験潮場は約1.4mほど隆起していることが潮位記録から読み取れます。また国会議事堂前にある水準原点も水準測量により86mm沈下していることが分かり水準原点の標高も改定されました。



関東地震から半年後の報告



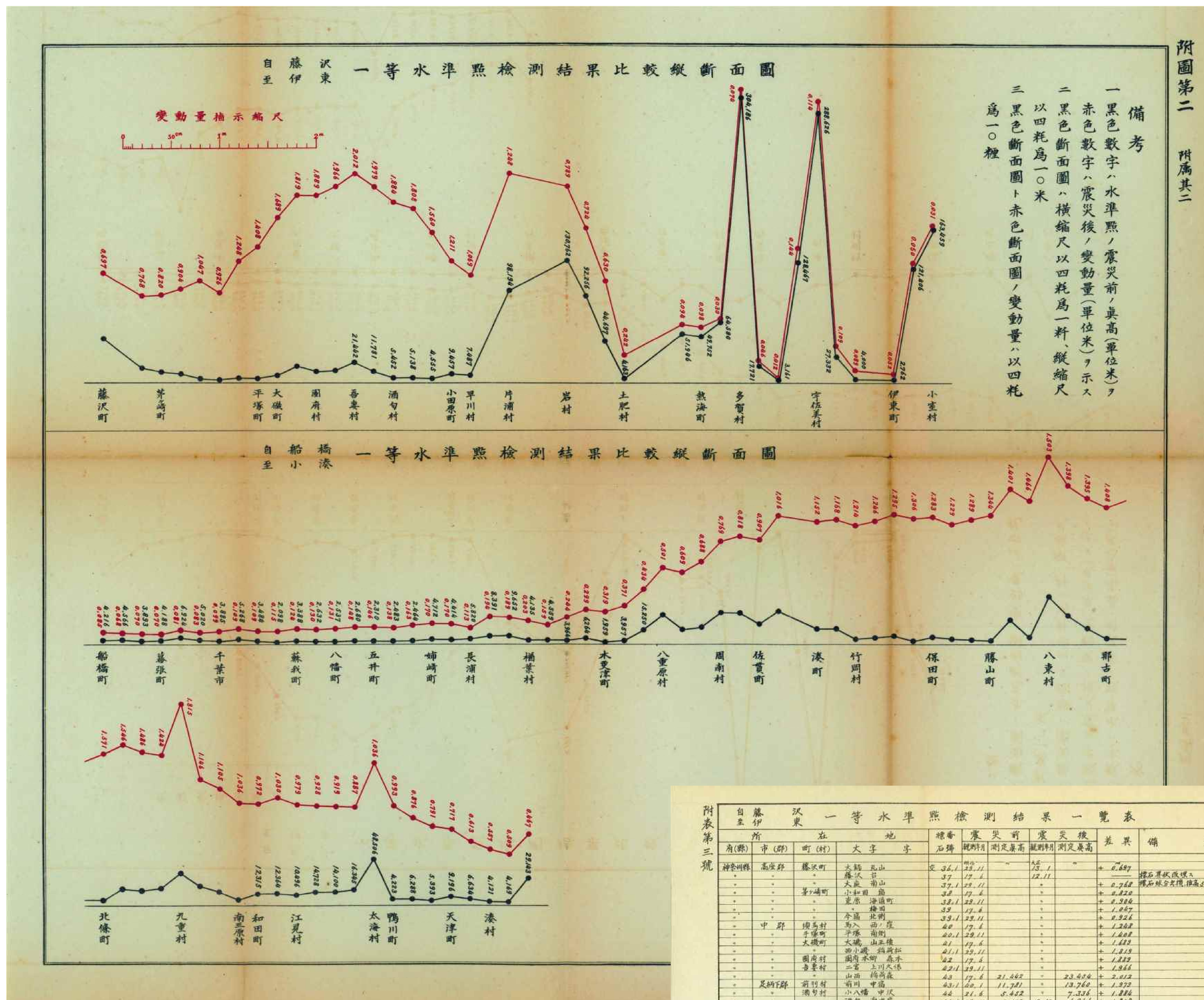
1923年(大正12年)9月1日地震当時における験潮場の潮位

「関東地方激震後二於ル震災地一等水準線路ノ変動二就テ（大正十三年三月 陸地測量部）」より

関東大震災(3) 地震後の垂直変動量

大正関東地震後の水準点の標高改定に関連し、故障した水準点の復旧、新たな標高値の決定等、変動量の調査を目的とした水準測量が実施されました。

水準測量は東京府、神奈川県、千葉県、埼玉県、群馬県、栃木県、茨城県、山梨県、長野県、静岡県の1府9県にわたり、地震直後の9月下旬から1926年(大正15年)度末までに2622kmの水準測量を行っています。



一等水準点検測結果比較縦断面図

地震前に測量した標高と地震後の9月下旬から約半年間の水準測量で得られた変動量を併記しています。

「関東地方激震後二於ル震災地一等水準線路ノ變動ニ就テ」(大正13年3月)より

附 表 第 三 號		一 等 水 準 點 檢 測 結 果 一 覽 表									
所 在 地		標高	差失前	差失後	差異	備 考					
(市縣)	(市縣)	町 (村)	大字	石碑	觀測年月	測定基面	觀測年月	測定基面			
神奈川縣	高座郡	藤沢町	元山	交	36.1	28.11	—	28.1	—	+ 0.687	標石異狀既嘆云 標石終分失損 推高云
			大藤	37.1	28.11	—	12.11	—	+ 0.268		
			小田	37.4	27.4	—	—	—	+ 0.268		
		第14町	東原	38.1	28.11	—	—	—	+ 0.386		
			梅田	38.1	28.11	—	—	—	+ 0.386		
			今須	38.1	28.11	—	—	—	+ 0.386		
		中 郡	境馬村	馬入	40	17.6	—	—	—	+ 1.262	
			千塚町	千塚	40.1	28.11	—	—	—	+ 1.262	
			大磯町	大磯	41	17.6	—	—	—	+ 1.262	
		足柄下郡	前沢村	西小磯	41.1	28.11	—	—	—	+ 1.262	
				西小磯	42	17.6	—	—	—	+ 1.262	
				國府村	國府	42	17.6	—	—	—	+ 1.262
		靜岡縣	田原郡	湯岡村	湯岡	42.1	28.11	—	—	—	+ 1.262
					山西	43	17.6	—	—	—	+ 1.262
					湯岡	43.1	28.11	—	—	—	+ 1.262
湯岡村	湯岡			44	21.6	—	—	—	+ 1.262		
	小八幡			44.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
	浦野			45	40.1	—	—	—	+ 1.262		
湯岡村	山王原			45	40.1	—	—	—	+ 1.262		
	川口			46.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
	西條			46	17.6	—	—	—	+ 1.262		
片瀬村	片瀬			47	28.1	—	—	—	+ 1.262		
	横野			47.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
	湯山			48	40.1	—	—	—	+ 1.262		
岩 村	岩 村			48.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
	赤 旗			49	40.1	—	—	—	+ 1.262		
	赤 旗			49.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
靜岡縣	田原郡	吉沢村	吉沢	50	17.6	—	—	—	+ 1.262		
			上黒川	50.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			新田町	50.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
		新田町	新田	50.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			長 森	50.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			伊豆山	51	17.6	—	—	—	+ 1.262		
		新田町	新田	51.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			熱海	52	17.6	—	—	—	+ 1.262		
			櫻 花	52.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
		茅賀村	茅賀	53	17.6	—	—	—	+ 1.262		
			三池山	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			八幡	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
		下茅賀	下茅賀	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			風間	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			細代村	細代	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262	
靜岡縣	田原郡	茅賀村	茅賀	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			三池山	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			八幡	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
		下茅賀	下茅賀	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			風間	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			細代村	細代	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262	
		茅賀村	茅賀	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			三池山	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			八幡	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
		下茅賀	下茅賀	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			風間	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			細代村	細代	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262	
		茅賀村	茅賀	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			三池山	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		
			八幡	53.1	28.11	—	—	—	+ 1.262		

一等水準点検測結果一覽表

関東大震災（４） 日本水準原点の標高値の改定

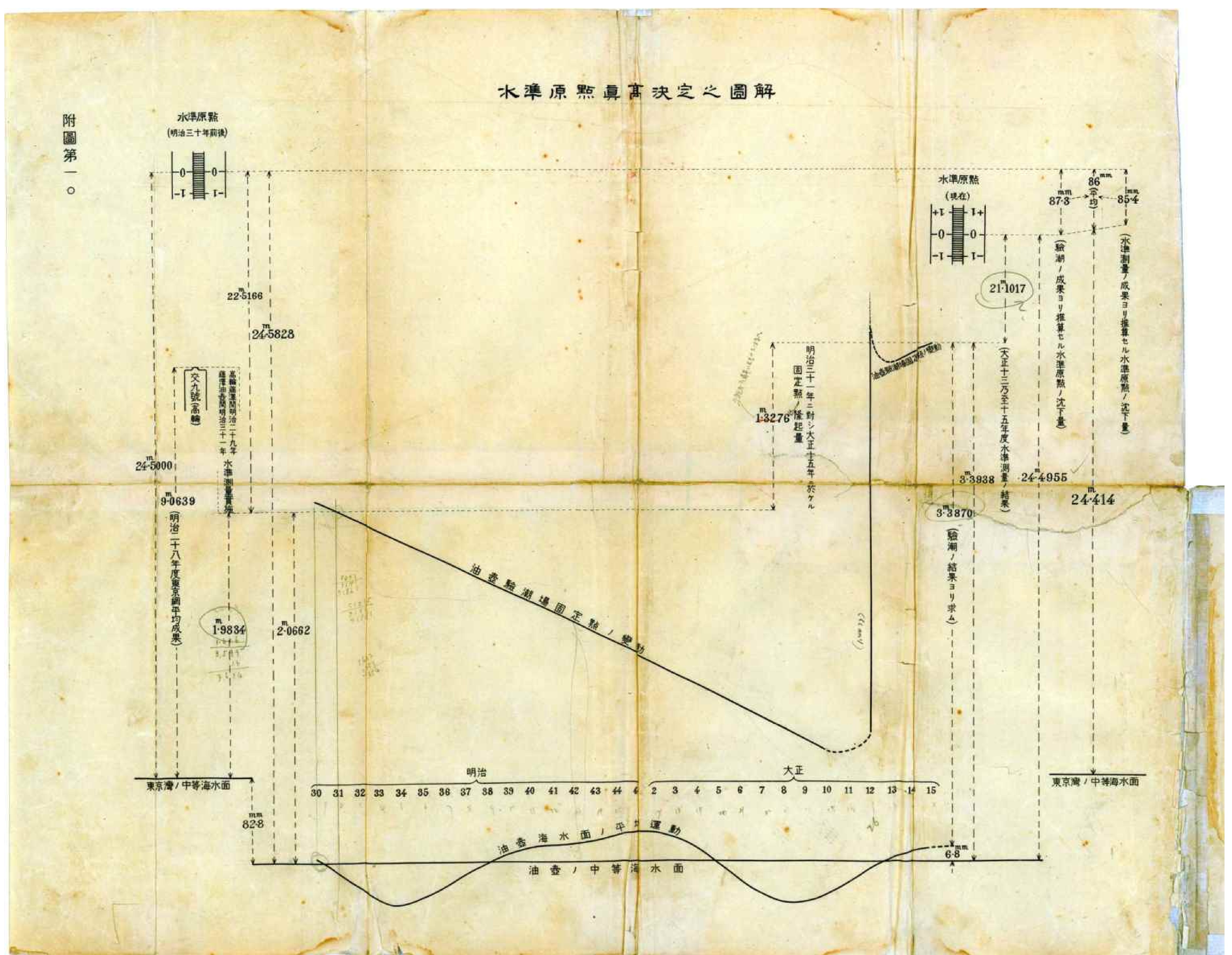
地震後に実施した水準測量により「水準原点」の標高変動が予測されたため、油壺験潮場の潮位観測点と地震による変動が少ない地区からの水準測量を基に日本水準原点の標高を改定しました。

1928年（昭和3年）3月に水準測量及び油壺潮位観測の結果から推算して水準原点の沈下量を86mmとして、水準原点設置時の24.500mを24.414mと改めました。（2011年（平成23年）東北地方太平洋沖地震時に再び24mm沈下し、現在の水準原点の標高は24.3900mになっています。）

油壺験潮場で1894年（明治27年）から大正関東地震まで観測している潮位観測と、地震後から大正15年までの潮位観測を比較するとともに、験潮場から水準原点までの水準測量結果で、水準原点が87.3mm沈下していることが分かりました。

一方、関東周辺の地殻変動の影響が少ない水準点から水準測量を行い水準原点が85.4mm沈下していることが分かりました。このことから各沈下量を平均した86mmを水準原点の沈下量としました。

下記の表は水準原点の標高決定について図解したものです。



水準原点真高決定之図解
「関東震災地復旧測量記事」(昭和5年2月)より

東京湾の中等海水面(平均海面)と油壺験潮場の中等海水面の関係や地震前の水準原点の標高決定時とともに、油壺験潮場の変動、地震時の変動が年ごとに図解されています。

地震による影響の少なかった地域や油壺験潮場からの水準測量で求められた値を平均して水準原点の標高を決定していることが表現されています。