宽频带地震仪灵敏度的温度依赖性

Tomofumi Shimoda*[1], Wataru Kokuyama[1], 和 Hideaki Nozato[1]

摘要

宽频带地震仪广泛应用于为地球物理学研究而部署的全球观测网络。近年来，对其灵敏度进行校准已成为确保观测精度的重要因素。由于地震仪在很宽的温度范围内运行，灵敏度的温度依赖性是限制校准不确定度的因素之一。然而，目前尚未建立能够准确测量地震仪温度系数的系统。在本文中，我们利用三轴振动激振器与恒温箱相结合，开发了这样一种系统。使用该系统，我们在不同温度下对多台宽频带地震仪（Trillium Compact、Trillium Horizon 360 和 CMG-3T）进行了校准，温度范围为 −15 °C 至+45 °C。我们发现，温度系数为 (0.11 ± 0.01) %/°C，这可归因于地震仪内部的磁体。相位延迟的变化对应于输出时间延迟小于 2 ms 的变化。此外，我们发现，1 赫兹以下的相对频率响应对温度变化保持稳定。这些数值有助于评估地震计观测网络的测量准确度。

arXiv:2603.01159v1 [physics.geo-ph] 1 Mar 2026

要点

- 三种型号的宽频带地震仪灵敏度均随温度呈线性变化，变化系数为 (0.11 ± 0.01) %/°C。
- 在 −15 °C 至 +45 °C 范围内，输出延迟的变化在 2 ms 以内。
- 低频截止频率的变化在 1 % 以内。**补充材料**

引言

评估宽频带地震仪的测量准确度，对于确保观测数据质量和检测仪器故障至关重要。例如，全球地震台网（GSN）将校准精度达到 1% 作为其设计目标之一（Lay 等(2002)）。尤其重要的是，在运行状态下校准灵敏度。地球物理学和计量学研究领域均已开发出此类校准技术——领域的研究人员。在一些校准技术中，全球事件（如正常模态（Davis 等 (2005)）或潮汐（Davis 和 Berger (2007)）被用作参考信号，其振幅在全球范围内一致或可预测。另一种方法是将观测到的地震信号与使用特定型号计算出的预期振动进行比较（Kimura 等 (2015)；Ekström 和 Nettles(2018)）。最直接的方法是将局部振动信号与位于目标地震仪附近的参考地震仪进行比较（Anthony 等(2017)；Klaus 等 (2024)；Kokuyama 等 (2025)）。在这些研究中，地震仪灵敏度的温度系数被视为一个重要的不确定性因素，它会影响参考地震仪的校准精度以及目标地震仪在观测期间的稳定性。然而，目前尚未建立准确评估地震仪灵敏度温度系数的方法。

尽管 ISO 16063-34 中已对加速度计温度系数的测量方法进行了标准化（国际标准化组织 (2019)），但相应的测量系统是为单轴测量设计的。因此，该方法无法用于具有三个传感轴且安装方向固定的宽频带地震仪。此外，典型宽频带地震仪的尺寸和重量（~ 30 cm 和~ 10 kg）都大于典型加速度计；因此，用于测量加速度计

1.日本国家计量院、日本产业技术综合研究所，筑波，日本，https://orcid.org/0000-0001-6198-1816 (TS) https://orcid.org/0000-0002-3813-2883(WK)https://orcid.org/0000-0001-9614-2203 (HN)

*通讯作者：tomofumi.shimoda@aist.go.jp

引用本文T. Shimoda、W. Kokuyama 和 H. Nozato（2022年）。宽频带地震仪灵敏度的温度依赖性，《美国地震学会通报》**XX**，1–8，doi：00.0000/0000000000。

© 美国地震学会

温度系数的系统可能无法满足宽频带地震仪的需求。Slad 等人近期的一项研究（Slad 等人 （2024）采用了温度试验台方法：将目标地震仪置于隔热箱内，并比较不同温度下区域地震的振动幅度。

本研究基于近期开发的环境测试系统（Shimoda 等人（2025）），提出并开发了一种测量宽频带地震仪灵敏度温度系数的方法。该系统将三轴振动激振器与恒温箱结合，在不同温度下对地震仪施加振动。利用这一配置，可在较短时间内系统地评估各种地震仪的特性。在测量过程中，将地震仪的输出信号与参考加速度计的输出信号进行比较，以计算各温度下的绝对中频灵敏度。此外，还利用校准线圈测量地震仪的相对频率响应。测量结果表明，不同类型的宽频带地震仪的温度系数通常约为 (0.11 ± 0.01) %/℃，且毫赫兹范围内的低频截止不受温度变化影响，保持稳定。此外，我们还对相移或校准线圈系数的温度依赖性进行了定量表征。

测量方法

图1 显示了实验装置。恒温箱固定在三轴振动激振器上，被测地震仪（SUT）和参考加速度计（REF）放置在恒温箱内。系统沿三个正交轴施加振动；恒温箱内的温度在 −30 ℃ 到 +80 ℃ 之间变化。本研究将温度点设为 −15 ℃、 0 ℃、 +15 ℃、 +23 ℃、 +30 ℃ 和 +45 ℃。装置静置过夜，使被测地震仪的温度在各温度点稳定下来；随后，在每个温度下进行绝对中频灵敏度校准和相对频率响应测量。使用连接在被测地震仪上的热电偶监测其实际温度（不确定度为 1-℃）。被测地震仪和参考加速度计的电源、放大器及数字化仪均放置在恒温箱外。

选取了四台宽频带地震仪作为被测传感器：两台 Trillium Compact（TC120，Nanometrics Inc.）、Trillium Horizon 360（TH360，Nanometrics Inc.）和 CMG-3T（Güralp Systems Ltd.）。请注意，由于数字化仪的记录通道数量有限，相对频率响应测量仅针对其中一台 TC120 进行。

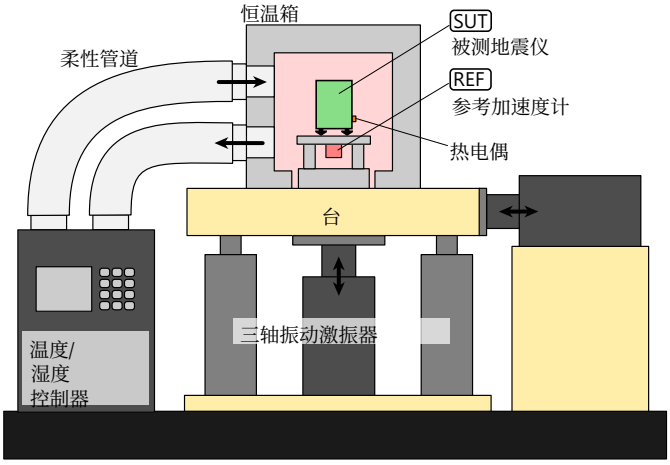

图 1. 地震仪灵敏度温度系数的测量装置。

绝对中频灵敏度校准

为校准被测传感器的绝对中频灵敏度，我们施加了频率范围为 1 赫兹–5 赫兹的正弦振动。使用 PXIe-4464（美国国家仪器）数字化仪记录被测传感器和参考传感器的输出电压信号，该数字化仪的输入阻抗为 1 MΩ。随后，我们通过比较输出信号的振幅，按如下方式计算被测传感器的灵敏度：

$$S_{\mathrm{SUT}}(f) = \frac{(2\pi i f)\tilde{V}_{\mathrm{SUT}}}{\tilde{V}_{\mathrm{REF}}} S_{\mathrm{REF}}(f), \qquad (1)$$

其中， $\tilde{V}_{\mathrm{SUT}}$ 和 S_{SUT} 分别是被测传感器（SUT）的输出信号（频率为 f时）的复振幅和绝对灵敏度（单位为 V/(m·s⁻¹)）。 $\tilde{V}_{\mathrm{REF}}$ 和 S_{REF}是参考传感器（REF）的对应参数，其中 S_{REF}的单位为 V/(m·s⁻²)；因此，采用转换因子$(2\pi i f)$ 将加速度转换为速度；上述方程中包含了这一因子。最后，本研究将中频带灵敏度 S_{mid} 定义为频率响应平坦时，1 Hz 至 1.6 Hz 范围内$|S_{\mathrm{SUT}}(f)|$的平均值。

在本研究中，我们分别使用沿 x、 y和 z轴的三台伺服加速度计作为参考传感器（REF）。按照 ISO 16063-11（国际标准化组织(1999) 标准化的初级校准方法，通过施加正弦振动，并将其与测量系统中配备的参考激光干涉仪进行比较，预先校准了它们的绝对灵敏度 S_{REF} 及其温度依赖性。校准时，参考传感器的温度在 −20 ℃ 至 +75 ℃ 之间变化，并在每个温度下，根据参考传感器输出与干涉仪测得的参考加速度之比确定灵敏度。由于干涉仪置于箱体外，仅将其激光束引入箱体内，因此校准结果仅反映参考传感器的温度依赖性。测得的

参考传感器的温度系数（~0.008 %/°C）在与被测传感器（SUT）进行比较时予以修正。参考灵敏度的估计相对标准不确定度($u(|S_{REF}|)/|S_{REF}|$) 为 0.15%。主要不确定度因素包括电压测量的准确度、温度波动、温度依赖性修正的准确度以及重复性。校准过程及其不确定度的详细信息见Shimoda 等人 (2025)。

为验证被测传感器的校准结果，我们进行了验证实验。首先，我们没有测试被测传感器，而是评估了与用作参考传感器的传感器相同型号的伺服加速度计。测得的温度系数为 0.004 %/°C，与参考传感器的温度系数（0.008 %/°C）处于相近的数量级，表明测量程序是合适的。此外，除了使用参考传感器进行比较校准（公式（1））外，我们还使用激光干涉仪对 Trillium Horizon 360 沿 y轴进行了初级校准。正如前文所述，该干涉仪可作为不受温度影响的绝对参考。初级校准结果与比较校准结果的差异在 0.1 % 以内，证明参考传感器没有引入显著误差。基于这些验证，我们得出结论：下一节所示结果反映了被测传感器的实际特性。

相对频率响应测量

使用校准线圈测量相对频率响应。线圈及其配对磁铁会产生电磁力，模拟地面加速度引起的惯性力。向校准线圈施加频率范围为 4 毫赫兹–1 赫兹的正弦电压，并使用线圈数据手册中的系数 G_{coil} （单位为 $(m{\cdot}s^{-2})/V$）计算等效加速度。随后按以下方式计算灵敏度：

$$S_{SUT,coil}(f) = \frac{(2\pi i f)\tilde{V}_{SUT}}{G_{coil}\tilde{V}_{coil}}, \quad (2)$$

其中，$\tilde{V}_{coil}$ 为校准输入电压的复振幅。再次使用因子 $2\pi i f$ 将加速度转换为速度。计算$S_{SUT,\ coil}(f)$ 相对于 1 赫兹的归一化值，作为相对频率响应，然后将其拟合到以下传递函数：

$$H(f) = \frac{(2\pi i f)^2}{(2\pi i f + \alpha + i\beta)(2\pi i f + \alpha - i\beta)}. \quad (3)$$

每个被测传感器在低频极点附近的频率响应由数据手册中的上述方程给出； α 和 β 是用于计算截止频率 $f_c = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}/(2\pi)$的拟合参数。

表1测得的温度系数

传感器		系数（%/°C）		
型号	序列号	EW	NS	Vert
Trillium Compact	008124	0.113	0.114	0.115
Trillium Compact	008159	0.114	0.112	0.115
Trillium Horizon 360	000790	0.105	0.104	0.106
CMG-3T	T311435	0.100	0.103	0.105

此外，将$S_{SUT,\ coil}$ 与绝对灵敏度 S_{mid}进行比较，可以推导出线圈系数 G_{coil} 的绝对值，如下所示：

$$G_{coil} = \frac{(2\pi i f)\tilde{V}_{SUT}}{S_{mid}\tilde{V}_{coil}}. \quad (4)$$

比较使用了 1 赫兹–1.6 赫兹频率范围内的数据。我们评估了 G_{coil} 的温度系数。

测量结果

图2显示了测得的中频带灵敏度。每个温度下灵敏度的估计标准不确定度为 ~0.18 %，其主要由参考加速度计灵敏度的相对不确定度（0.15%）、测量期间温度波动的影响（0.1%）以及数字化仪的电压测量精度（0.02%）决定。如图2所示，对于每台地震仪，灵敏度随温度的变化几乎呈线性关系。拟合得到的温度系数显示在图 2 的图例中，并汇总于表 1中。测得的四台地震仪的系数相近（~0.11 %/°C）；该值远高于参考伺服加速度计的系数（~0.008 %/°C）。偏离线性拟合的部分表明，在 ±0.15 % 以内，灵敏度的高阶温度依赖性影响很小。

图 3 显示了相移的温度依赖性， $\arg(S_{SUT})$。由于相移取决于频率，因此将 1.25 赫兹处的结果作为代表值列出。与中频带灵敏度一样，相移随温度呈线性变化，其系数约为 0。001°/°C、0。011°/°C 和 0。005°/°C，分别对应 Trillium Compact、Trillium Horizon 360 和 CMG-3T 在 1.25 赫兹处的结果。温度系数的频率依赖性绘于图4中。这些系数大致与频率成正比，并在低频范围内变小。

图5 显示了由不同温度下的相对频率响应拟合得到的截止频率变化。Trillium Compact 地震仪表现出线性依赖关系，系数为 0.002 毫赫兹/°C。相比之下，截止频率变化没有显示出明显趋势

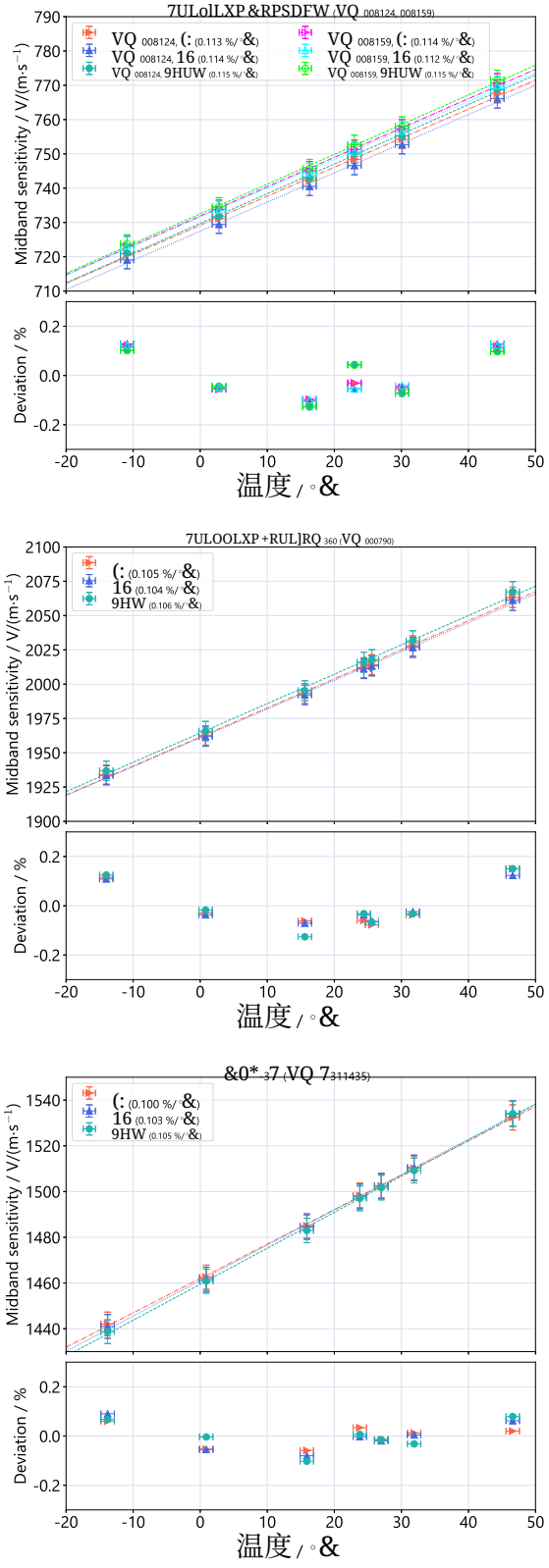

图 2. Trillium Compact（上）、Trillium Horizon 360（中）和 CMG-3T（下）地震仪的中频带灵敏度随温度的变化。每幅图的上半部分显示测量值（点）及其线性拟合（线），下半部分显示相对于拟合结果的偏差。

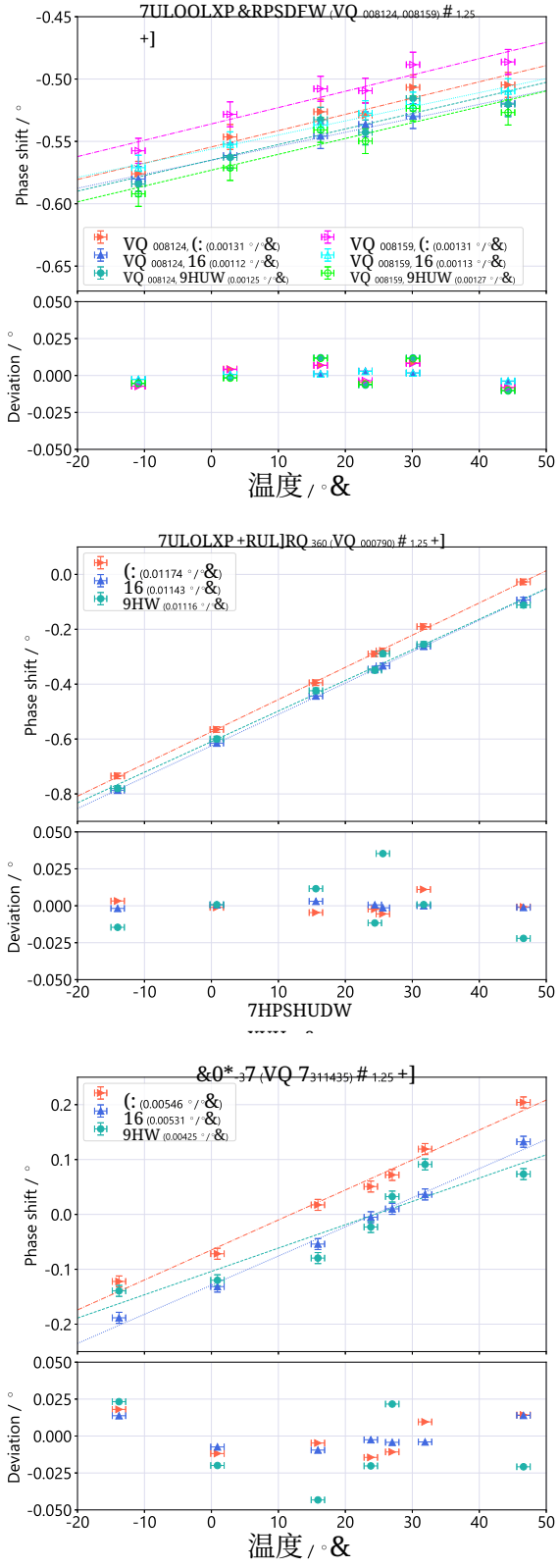

图 3. Trillium Compact（上）、Trillium Horizon 360（中）和 CMG-3T（下）地震仪在 1.25 赫兹处的相移随温度的变化。

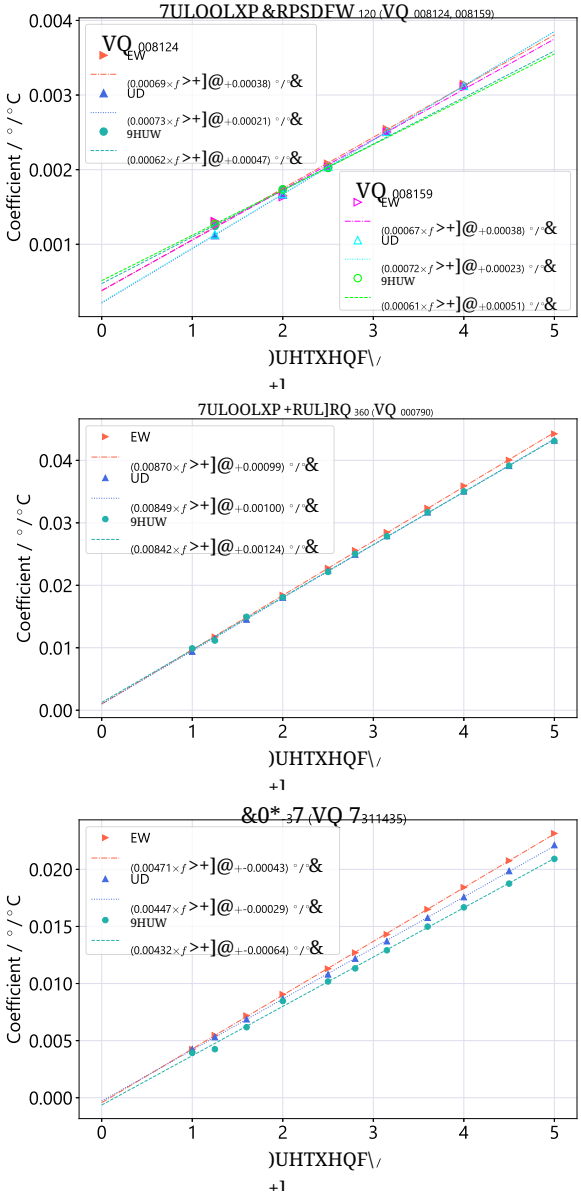

图 4. Trillium Compact（上）、Trillium Horizon 360（中）和 CMG-3T（下）地震仪的相移温度系数的频率依赖性。

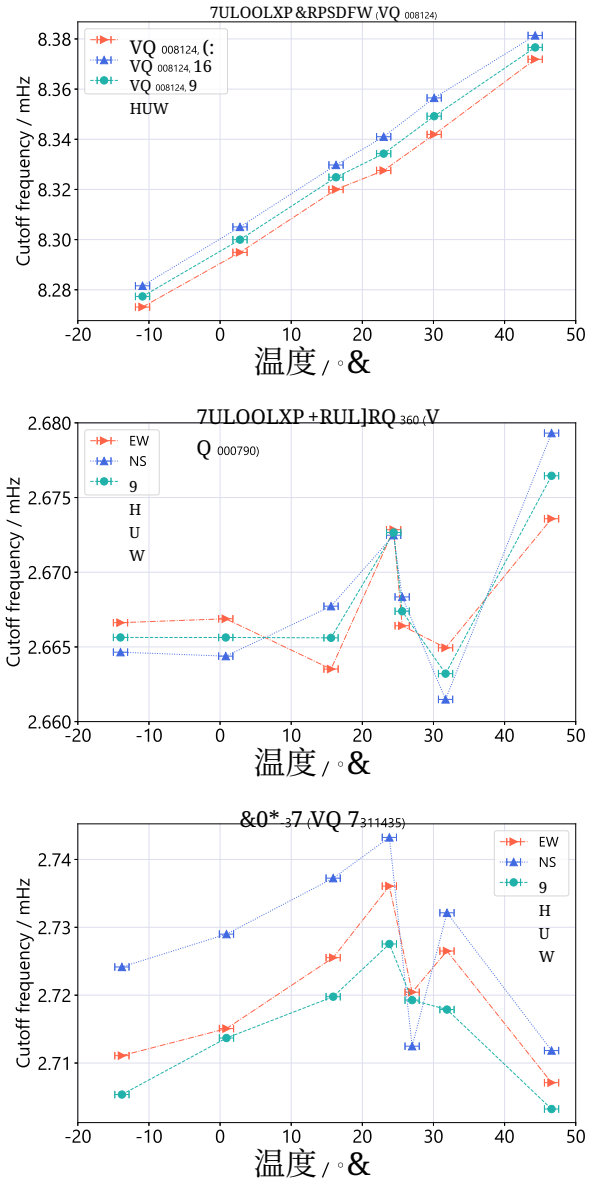

图5。 Trillium Compact（上）、Trillium Horizon 360（中）和 CMG-3T（下）地震仪的拟合低频截止频率随温度的变化。

另外两台地震仪也观察到了这一现象。这可能是由于截止频率（≈2.7 毫赫兹）超出了测量频率范围（> 4 毫赫兹），从而产生较大的拟合误差所致。在温度范围（−15 °C 至 +45 °C）内，其偏差均在各截止频率约 1% 以内。

图6 展示了根据公式（4）计算得出的校准线圈系数随温度的变化。我们观察到，G_{coil} 与中频带灵敏度的变化呈反向关系。因此，S_{mid} 、G_{coil} 使温度系数较小：Trillium Compact 地震仪为 0.018 %/°C，Trillium Horizon 360 和 CMG-3T 地震仪为 0.002 %/°C。这些数值表明，如下一节所述，G_{coil} 的变化是 S_{mid}中温度系数的主要来源。

讨论

估算得到的中频段灵敏度温度系数为 (0.11 ± 0.01) %/°C。在地震观测中，该数值可能不可忽略。例如，温差为 10 °C 时，灵敏度差异可达 1.1%，超过全球地震台网（Lay 等人 (2002）所要求的精度。经过实验室校准的地震仪移至观测地点后，应根据现场温度对其灵敏度进行修正。

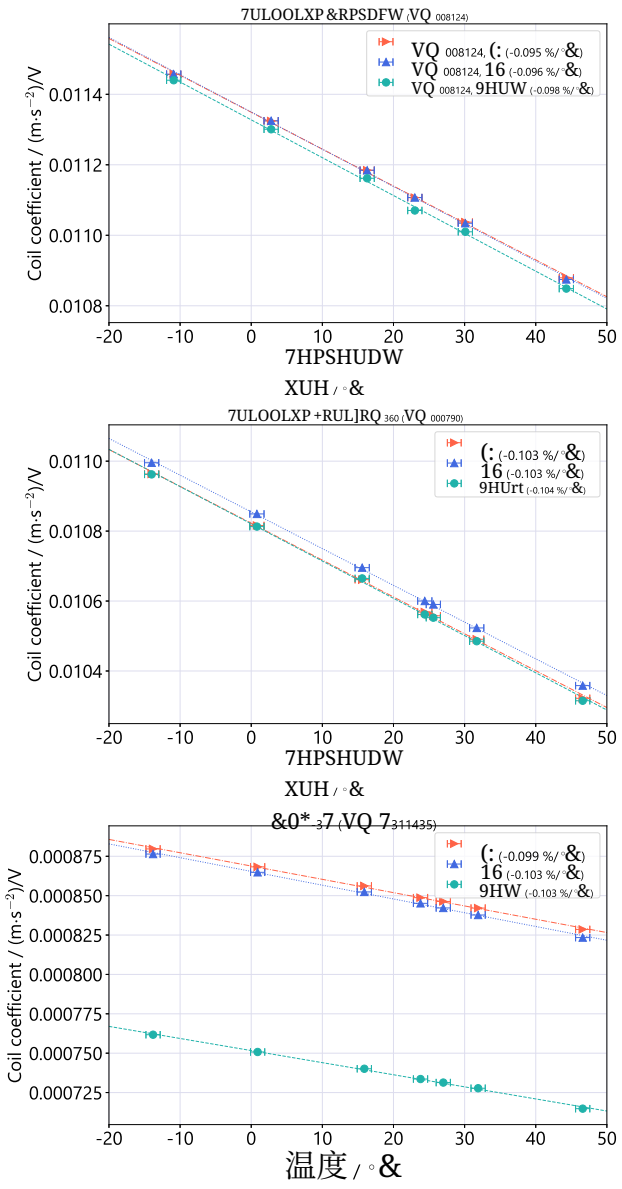

图6. Trillium Compact（上）、Trillium Horizon 360（中）和 CMG-3T（下）地震仪的校准线圈系数 G_{coil} 随温度的变化。

此外，温度系数可能导致观测到的振动幅度出现全球性的系统差异，幅度最高可达几个百分点；例如，赤道和南极地区周围的温度相差几十摄氏度。因此，必须考虑每个观测地点的温度，以确保观测精度。

接下来，我们讨论温度依赖性的成因。图 7 展示了典型宽频带地震仪的简化框图（基于Ackerley (2015); GüralpSystems Ltd. (2023)）。速度灵敏度推导如下：

$$S_{\text{SUT}} = \frac{(2\pi if)V_{\text{SUT}}}{a_{\text{g}}} = \frac{(2\pi if)F_{\text{out}}H}{1+HFG_{\text{coil}}} \approx \frac{(2\pi if)F_{\text{out}}}{FG_{\text{coil}}}. \quad (5)$$

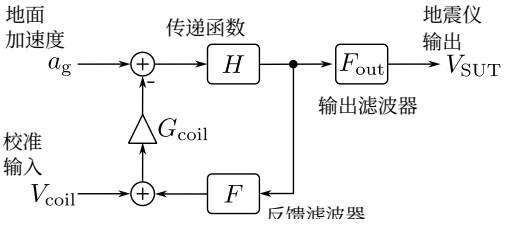

图7. 典型力平衡地震仪的简化框图。传递函数 H 包括摆响应、位移传感器和积分器。

在上述方程中，采用了足够大的（$HFG_{\text{coil}} \gg 1$）进行近似。如前一节所述，乘积 $S_{\text{SUT}} \cdot G_{\text{coil}} = (2\pi if)F_{\text{out}}/F$ 的温度系数很小。因此， S_{SUT} 或 S_{mid} 的温度系数主要源自 G_{coil}。导致 G_{coil}变化的最可能原因是与线圈配对的磁体；例如，钕铁硼磁体剩余磁通密度的温度系数范围为 −0.09 %/℃ 至 −0.12%/℃（Trout (2017)）。Bainbridge等 (2025) 也报告了类似结论。然而，进一步研究需要掌握组件的详细信息，这超出了本研究的范围。

各地震仪的相移温度系数各不相同。在 1.25 赫兹处，测量温度范围（−15 ℃ 至 +45 ℃）内，Trillium Compact、Trillium Horizon 360 和 CMG-3T 地震仪的变化量分别为 0.1°、0.8°和 0.4° （图 3）。相应的时间偏移分别为 0.2 毫秒、1.7 毫秒和 0.9 毫秒。鉴于全球地震台网（GSN）要求的计时精度为 10 毫秒，这些变化不会对宽频带地震观测造成重大影响。对于所有地震仪，温度系数与频率近似成正比（图 4）。这表明，相移随温度的变化可能归因于机械部件或电子元件的高频特性。

低频截止频率的变化很小。在宽频带地震仪中，低频截止频率由电阻器和电容器组成的反馈电路决定。通常，这些元件的温度系数约为100 ppm/℃，尽管该数值可能因具体产品而相差数倍。因此，在该温度范围（−15 ℃至 +45 ℃）内，它们可引起约0.6%的频率偏移，对应于Trillium Compact的0.05 mHz，或Trillium Horizon360和CMG-3T地震仪的0.02 mHz。考虑到元件温度系数的不确定性，图5 的结果与该估计一致。

结论

对四台宽频带地震仪在不同温度下进行了标定。测得的中频带灵敏度温度系数为 (0.11 ± 0.01) %/℃，相对频率响应对温度变化保持稳定。当地震仪在与室温（~23 ℃）相差较大的温度下工作时，应考虑这种依赖性。为确保观测精度在1%以内，温度监测精度应达到8-℃。使用合适的温度计即可轻松实现。

用作线圈-磁体驱动器的永磁体的温度系数可能会导致灵敏度随温度变化；预计同一型号的地震仪会出现一致的变化。事实上，本研究使用的两台 Trillium Compact 地震仪表现出非常相似的温度系数（图2）。这可以简化对温度相关灵敏度的校正，因为每种型号只需对少量个体进行特性测定。下一步，我们将研究更多地震仪，以建立校正方法。这项工作有助于提高全球地震观测网的准确性和可靠性。

数据与资源

本文使用的所有测量数据均由我们自行采集，并可在提出合理请求后提供。

利益冲突声明

作者确认，目前没有记录在案的利益冲突。

致谢

本研究由日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）委托的项目提供支持。

参考文献

Ackerley, N. (2015).《宽带地震测量原理》，第 1941–1970 页。柏林，海德堡：Springer Berlin Heidelberg。

Anthony, R. E., A. T. Ringler, and D. C. Wilson (2017, 12). 使用局部地球重力测量改进地震仪绝对灵敏度标定。《美国地震学会通报》**108**(1), 503–510。Bainbridge, G., B.Townsend, and M. Jusko(2025)。地震仪器的现场标定。Nanometrics Inc. Davis, P. and J. Berger (2007, 07). 利用潮汐校准全球地震台网。《地震研究快报》**78**(4), 454–459。Davis, P., M. Ishii, and G. Masters (2005, 11). 全球地震台网传感器响应信息准确性的评估。《地震研究快报》**76**(6), 678–683。Ekström, G. and M. Nettles (2018, 05). 对 USArray 台站地震仪校准和定向的观测，2006–2015。

《美国地震学会通报》**108**(4), 2008– 2021。

Güralp Systems Ltd.（2023）。Güralp 3T 操作指南。

国际标准化组织（1999）。ISO 16063-11:1999，振动与冲击传感器的校准方法——第11部分：通过激光干涉测量进行振动初级校准。

国际标准化组织（2019）。ISO 16063-34:2019，振动与冲击传感器的校准方法——第34部分：固定温度下的灵敏度测试。

Kimura, T.、H. Murakami 和 T. Matsumoto（2015）。高密度宽频带地震网络中的仪器设备状态系统监测。*Earth,PlanetsandSpace* **67**(55)。

Klaus, L.、M. Schwardt、C. Pilger、A. Canu、F. Larsonnier、J. H. Winther、N. Tranchant 和 A. Havreland（2024）。将地震测量与国际单位制相联系。纯粹与应用地球物理学 **182**，5081–5108。Kokuyama, W.、A. Araya、T. Shimoda 和 H. Nozato（2025）。宽频带地震仪的现场校准。测量：传感器 **38**，101752。Lay, T.、J. Berger、R. Buland、R. Butler、G. Ekström、B. Hutt 和 B. Romanowicz（2002）。2002年全球地震观测网设计目标更新。Shimoda, T.、W. Kokuyama 和 H. Nozato（2025）。各种环境条件下低频三轴振动传感器的精确实验室测试。*arXiv:2512.10771*。Slad, G. W.、B. J. Merchant 和 D. K. Bloomquist（2024）。地震传感器温度试验台在桑迪亚国家实验室的应用。桑迪亚国家实验室（SNL-NM），美国新墨西哥州阿尔伯克基。Trout, S.（2017）。重新审视永磁体的可逆温度系数。技术报告，Spontaneous Materials。

稿件收到日期：0000年00月