# 使用“颗粒物复合分析仪”的 PM2.5 发生源推测解决方案

Solution for Estimating Generation Source of PM 2.5 with “Aerosol Analyzer”

小泉 和裕 KOIZUMI, Kazuhiro　武田 直希 TAKEDA, Naoki　中村 裕介 NAKAMURA, Yusuke

近年来，粒径 2.5 μm 以下的细颗粒物（PM2.5）导致的大气污染让人们倍感担忧。在污染严重的亚洲，预计今后将正式开展削减 PM2.5 的工作，因此，需要确立有效的削减对策。富士电机的“颗粒物复合分析仪”可对 PM2.5 的主要成分进行自动分析。成分的测定数据中包含发生源的信息，有望通过数据分析推测主要发生源，帮助确立有效的削减对策。从川崎市和中国的测定例中可以看出，此分析仪能够推测发生源的大致位置。

In recent years, air pollution has become a concern due to fine particles (PM 2.5) that have a diameter of 2.5 $\mu$m or less. In particular, pollution has become a serious problem in Asia, and in the future, it is expected that effective measures to reduce PM 2.5 will be sought and adopted in earnest. Fuji Electric's “Aerosol Analyzer” is capable of automatically analyzing the main components of PM 2.5. Since the measured component data includes information concerning the sources of origin of the PM 2.5, it is expected that the estimation of the main sources of origin through data analysis will contribute to creating effective measures of mitigation. Measurement examples in Kawasaki City and in China showed that it is possible to estimate the approximate location of the sources of origin.



## 1 引言

颗粒物（悬浮在大气中的微小粒子）会对大气污染造成严重影响，因此，对其实态的解析和对策制定工作正不断得到推进。粒径（粒子直径）和成分是颗粒物的重要参数。颗粒物粒径从几 nm 到 100 μm，跨度很大。其中，粒径 2.5 μm 以下的颗粒物被称为 PM2.5。PM2.5 可到达肺部深处、影响健康，因此日本在 2009 年公布了环境标准〈注〉。

PM2.5 有多种成分，主要包括硫酸盐（主要是硫酸根离子：$SO_4^{2-}$）、硝酸盐（主要是硝酸根离子：$NO_3^-$）等无机物，以及有机物、碳黑（碳元素）等。碳黑和部分有机物存在于柴油机等的废气中，是从发生源直接排出的一次颗粒物。另一方面，硫酸盐、硝酸盐等是由从发生源中排出的 $SO_2$、$NO_X$ 等前体物质在大气中发生化学反应等而生成的，因此被称为二次颗粒物。PM2.5 的成分是帮助阐明发生源的重要信息，所以，地方公共团体不仅要继续现有 PM2.5 质量浓度的测量，还要进行成分分析[1]。

PM2.5 的成分分析一般是通过标准测定法，即过滤法进行的。过滤法是将 PM2.5 采集到过滤器中后，通过手动作业进行分析的。需要耗费大量时间和费用，所以多限定期间实施。针对于此，富士电机实现了以 PM2.5 的主要成分为测定对象，从采样到测定可自动进行的“颗粒物复合分析仪”的产品化。本稿将对颗粒物复合分析仪的特点、测定原理、测定事例以及使用该产品的 PM2.5 发生源推测解决方案进行介绍。

〈注〉环境标准：1 年平均值应在 15 μg/m³ 以下，且 1 天平均值应在 35 μg/m³ 以下

## 2 “颗粒物复合分析仪”

### 2.1 特点

**图 1** 展示了颗粒物复合分析仪的外观。颗粒物复合分析仪能实时地对 PM2.5 的主要成分进行定量分析。

⑴ 通过复合分析 3 成分同时测定

利用组合了光散射法、激光诱导白炽法和质谱分析法的复合分析法，可同时测定硫酸盐、硝酸盐和碳黑。

⑵ 实时成分分析

能够以 15 分钟的测定周期完成过滤法需要长达 8 小时以上的成分分析。

⑶ 成分的定量分析

利用采用了 MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）技术的颗粒捕集器高效捕集 PM2.5，使过去难以实现的定量分析变为可能。

⑷ 触摸屏上的显示和操作

利用配置于颗粒物复合分析仪主体前面的触摸屏可进行

图 1 “颗粒物复合分析仪”

主要的操作。除了显示测定值，还能监控运行状态、显示报警。

### 2.2 规格

**表 1** 展示了颗粒物复合分析仪的主要规格。

### 2.3 测定原理

颗粒物复合分析仪由白炽光检测部和质谱分析部构成。**图 2** 展示了测定原理。

白炽光检测部测定 PM2.5 和碳黑的质量浓度。将高输出红外线激光照射到样品空气上时，检测样品空气中含有的颗粒物发出的散射光和白炽光。根据散射光的强度和频率，测定粒径和粒子数，求得 PM2.5 的质量浓度。同时，根据白炽光的强度和频率，求得 PM2.5 含有的碳黑的质量浓度。

表 1　颗粒物复合分析仪的主要规格

| 项目 | 规格 |
|---|---|
| 测定对象 | ○ PM2.5 的质量浓度<br>○ PM2.5 含有的碳黑的质量浓度<br>○ PM2.5 含有的硫酸盐的质量浓度<br>○ PM2.5 含有的硝酸盐的质量浓度 |
| 测定方式 | ○光散射法： PM2.5 的质量浓度<br>○激光诱导白炽法： 碳黑的质量浓度<br>○质谱分析法： 硫酸盐、 硝酸盐的质量浓度 |
| 测定范围 * | ○ PM2.5： 0～100 μg/m³ 或 0～1000 μg/m³<br>○碳黑： 0～30 μg/m³ 或<br>0～300 μg/m³<br>○硫酸盐： 0～30 μg/m³ 或 0～300 μg/m³<br>○硝酸盐： 0～30 μg/m³ 或 0～300 μg/m³ |
| 样品采集量 | 约 2.0 L/min |
| 电源电压 * | AC100 V±10%， 50 Hz/60 Hz±5% 或<br>AC220 V±10%， 50 Hz±5% |
| 耗电量 | 约 1 kVA （最大 1.5 kVA） |
| 外形尺寸 | 装置主体： W640×H1740×D828 （mm） |
| 质量 | 装置主体： 约 320 kg |
| 附件 | 涡旋泵、 UPS、 冷却器等 |

* 测定范围、 电源电压： 购入时选择

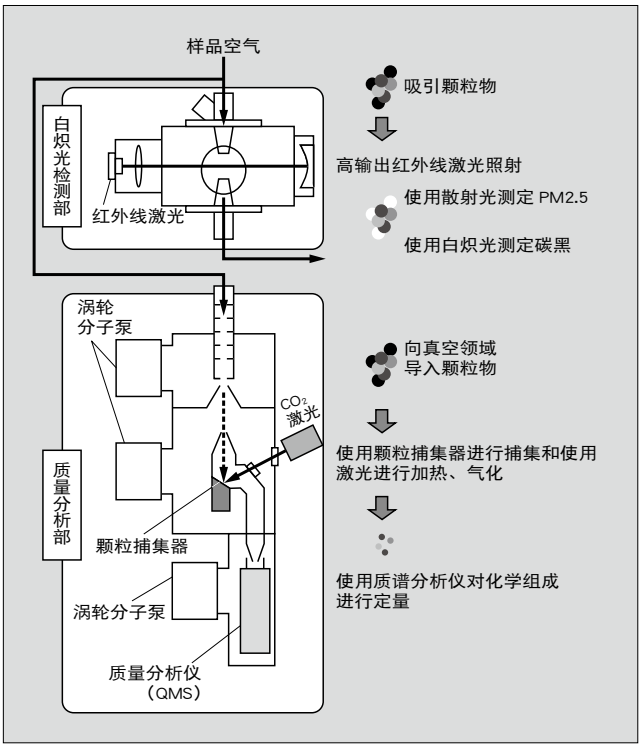


图 2 “颗粒物复合分析仪”的测定原理

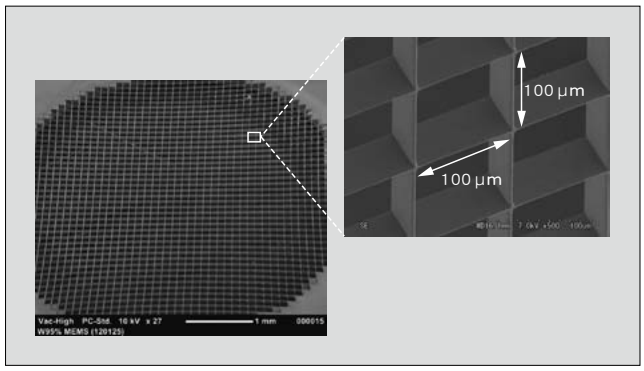


图 3　颗粒捕集器的外观

质谱分析部测定 PM2.5 中含有的离子成分的硫酸盐和硝酸盐的质谱浓度。在线实施的 PM2.5 成分质谱分析手法，有直接用激光使成分电离化，再进行质谱分析的激光电离化质谱分析法，和先捕集 PM2.5，加热气化后电子电离化，再进行质谱分析的热解析电子电离化质谱分析法 2 种。激光电离化质谱分析法具有高灵敏度的特点，但不同成分电离化的效率会有所变化，因此难以进行定量分析。另一方面，热解析电子电离化质谱分析法对电离化无选择性，显示出了良好的定量性。颗粒物复合分析仪基于对导入样品空气中含有的 PM2.5 进行定量分析的观点，采用了热解析电子电离化质谱分析法。

若将样品空气导入质谱分析部的真空室内，样品空气中的气体将被除去，仅 PM2.5 被捕集到颗粒捕集器中。该颗粒捕集器具备以 MEMS 技术制作而成的独创结构，可实现 90% 以上的高捕集率[2]。**图 3** 展示了颗粒捕集器的外观。颗粒捕集器的捕集部由 100 μm 边长的方格构成。通过叠加多块这种方格状的板子，可使真空中高速前进的 PM2.5 反复撞击到颗粒捕集器的内壁上，吸收其动能，将其捕集。然后用高输出的红外线激光（$CO_2$ 激光）照射该 PM2.5，加热气化，再用电子离子源电离化，然后，用四极杆质谱仪（QMS：Quadrupole Mass Spectrometer）对硫酸盐和硝酸盐进行定量分析。

### 2.4 测定事例

我们在地方公共团体的协助下，实施了现场评估。2013 ～ 2015 年度实施的与川崎市的共同研究（川崎市环境技术产学公民合作共同研究事业）中，我们在一般环境大气测定站设置了颗粒物复合分析仪，验证了测定性能和维护性能。**图 4** 中展示了以硫酸盐和硝酸盐为对象进行的与过滤法的比较评估结果。颗粒物复合分析仪和过滤法分析得到的判定系数 $R^2$ 分别在 0.9 以上，证实具有高度的相关性。

另外，不仅限于日本国内，我们还在海外进行现场评估。**图 5** 展示的是在中国进行连续测定的事例。确认到即使在 PM2.5 质量浓度超过 100 μg/m³ 的高浓度环境中，也能顺利、实时地进行连续测定。

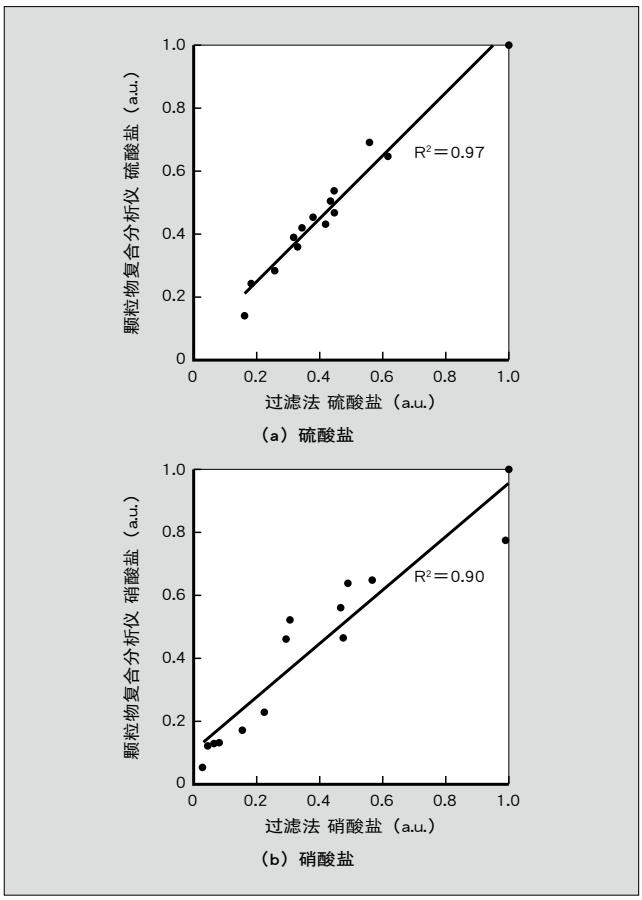


图 4　与过滤法的比较评估结果

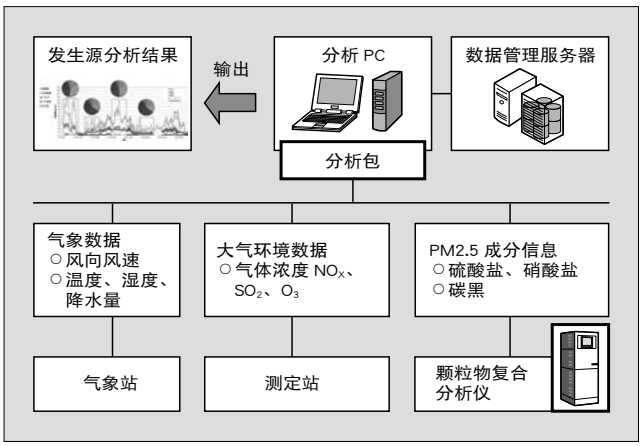


图 6　PM2.5 发生源推测系统的结构

## 3　PM2.5 发生源推测解决方案

### 3.1　发生源推测的必要性

面临严重污染的中国，削减 PM2.5 的措施正在切实推行，大气污染防治行动计划（中国国务院 2013 年 9 月发表）提出了北京、天津、河北、长江三角洲、珠江三角洲各地区 PM2.5 的年平均浓度到 2017 年与 2012 年相比降低 15 ～ 25% 左右的目标。根据北京市环境保护局的北京市 PM2.5 来源分析（2014 年 4 月发表），PM2.5 的主要产生要因，汽车占 31%，煤炭燃烧占 22%，工业生产占 18%，扬尘占 14%，其他占 14%。另外，还表明在重要国际会议或体育赛事举办之际，若实施汽车交通管制、工厂停工，大气污染会有明显改善。但这种管制会妨碍经济活动，因此难以长期实施。

为兼顾环境问题的解决和经济的持续发展，必须把握产生的实态，落实高效的发生源对策。对于测量仪器，不仅是 PM2.5 的测定，关系到削减对策的发生源分析的需求也在急速增加。因此，富士电机正致力于开发将颗粒物复合分析仪的测定数据和前体物质、气象信息结合起来进行分析，推测发生源的 PM2.5 发生源推测系统。**图 6** 中展示了系统的结构。

### 3.2　发生源分析技术的概要

在分析发生源时，我们首先关注二次颗粒物（硫酸盐、硝酸盐）的生成过程，从二次颗粒物和其前体物质在大气中的寿命、扩散过程的差别中推测发生源。气体状的前体物质因为大气循环，无论发生源在何处，排出后都将直接扩散，然后经过与周围空气混合，浓度逐渐降低。另一方面，雨雪等降水是 PM2.5 主要的清除过程，因此，在无降水等环境条件下，PM2.5 也可能在大气中滞留 1 周以上，形成长距离传输。

因此，我们对二次颗粒物的浓度和前体物质的气体浓度的相关性进行分析，它们的浓度变化相关性较高时，推

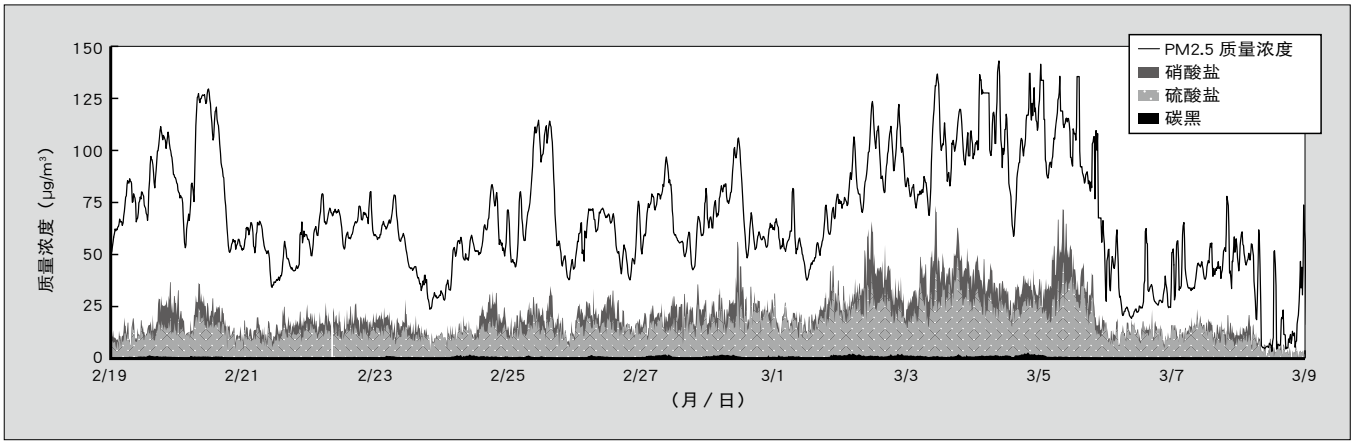


图 5　在中国的测定事例

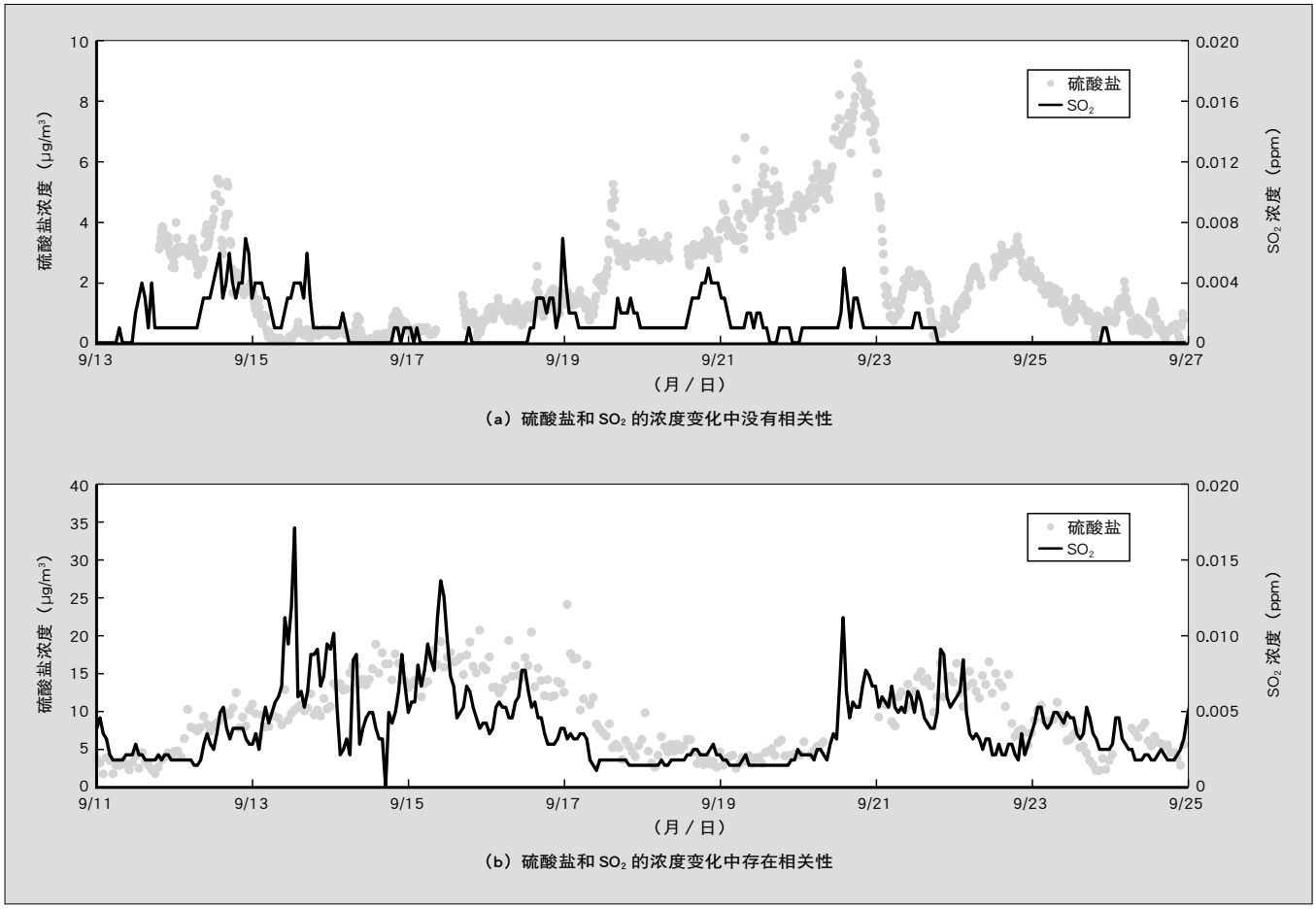


图 7　硫酸盐和 $SO_2$ 的分析事例

测发生源靠近测定场所（估计大约不足 100 km）。另一方面，相关性较低时，则推测发生源远离测定场所（估计大约在 100 km 以上），从地区外迁移过来的可能性很高。如上所示，PM2.5 浓度受天气影响大，因此必须结合气象信息进行分析。

### 3. 3　分析事例

**图 7** 中展示了硫酸盐和其前体物质 $SO_2$ 的分析事例。**图 7**(a)和**图 7**(b)是在不同地区测定的数据。硫酸盐是用颗粒复合分析仪得到的测定数据，$SO_2$ 是用其他气体分析仪得到的测定数据。

**图 7**(a)中看不出硫酸盐和 $SO_2$ 在浓度变化中存在相关性。此时，可以推测硫酸盐的发生源远离测定场所。这一期间的天气多为晴天，从气象图来看，移动性高气压由西向东移动，可以推测多数颗粒物是受偏西风的影响，从西部迁移过来的。

**图 7**(b)显示硫酸盐的浓度随着 $SO_2$ 浓度变化，可以看出硫酸盐和 $SO_2$ 在浓度变化中存在相关性。此时，推测硫酸盐的发生源就靠近测定场所。这一期间的天气为晴天或多云，风向基本一直是西北风，可推测位于测定位置西北方向数 10 km 处的煤炭火力发电厂是主要的发生源。

### 3. 4　今后的发展

如上所述，通过分析二次颗粒物和前体物质的相关性，可推测发生源。现行的分析仅止步于大致推测，但我们认为在相应地区设置多台颗粒物复合分析仪、增加测定位置，并对包括主要工厂、发电厂的开工信息、交通量信息、地形信息等进行分析，便可详细推测发生源。另外，今后还计划和地方公共团体共同实施 PM2.5 发生源推测系统的实证项目。

## 4　后记

本稿就能实时对 PM2.5 的主要成分进行定量分析的“颗粒物复合分析仪”，以及使用该仪器的 PM2.5 发生源推测解决方案进行了介绍。PM2.5 对大气污染以及地球温室效应等气候变动都有较大影响，是需要全球共同努力解决的课题。今后，作为微粒精密测量技术的基础，富士电机将提供测量解决方案，为保护地球环境和社会的可持续发展做贡献。

**参考文献**

(1)　“微小粒子状物質（PM2.5）の成分分析ガイドライン”. 環境省. https://www.env.go.jp/air/osen/pm/ca/110729/no_110729001b. pdf, (参照 2016-06-23).

(2)　Takegawa, N. et al. “Evaluation of a New Particle Trap in a Laser Desorption Mass Spectrometer for Online Measurement of Aerosol Composition.” Aerosol Science and Technology, 46.4 (2012)：p.428-443.

**小泉　和裕**

从事环境测量仪器的研究开发。现为富士电机株式会社技术开发本部核心技术研究所测量技术开发中心测量解决方案开发部经理。日本颗粒物学会会员。

**中村　裕介**

从事测量仪器的设计开发、事业运营。现为富士电机株式会社产业基础设施事业本部产业测量仪器事业部测量仪器技术部主席。

**武田　直希**

从事粒子测量仪器的研究开发。现就职于富士电机株式会社技术开发本部核心技术研究所测量技术开发中心测量解决方案开发部。日本颗粒物学会会员。

富士电机

Fuji Electric

＊本刊记载的公司名称及产品，有可能是各相关公司的商标或注册商标。