

Understanding the Disparities in Exposure to a Health-Supportive Environment Using Mobility Data and Satellite Remote Sensing

東北大学文学研究科 D1
山口侑平



今日の発表資料

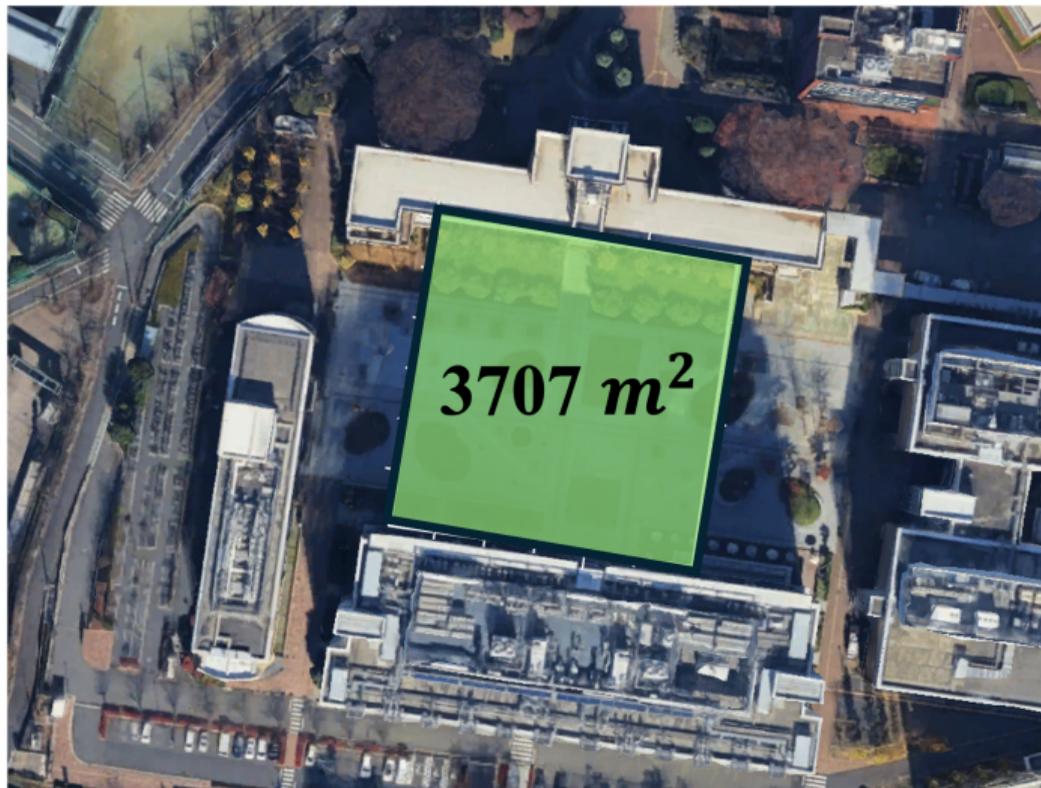
CONTENTS

- 1 Research Background
- 2 Data and Methods
- 3 Results
- 4 Conclusion

CONTENTS

- 1 Research Background
- 2 Data and Methods
- 3 Results
- 4 Conclusion

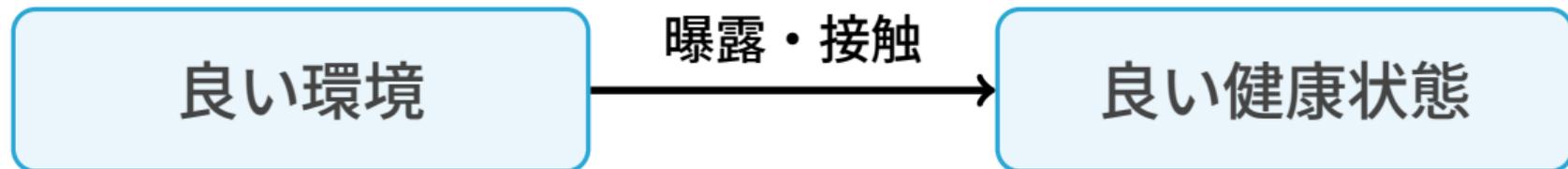
みなさん、お金、持ってますか？ 持ってますよね？



お金持ちの居住地は、貧しい人の居住地と比べて
 $3,707 m^2$ 分の森林が多い^a
(大阪豊中データでの分析結果)

^a世帯所得 1260 万円のエリアと、200 万円のエリアとの間には、居住地半径 $0.1 km$ 圏内に、これだけの量に相当する緑地の差があるということ

環境と健康は密接に関わっている



- **緑地**への曝露: 死亡率を低減 (James et al., 2016; Takano, 2002; Donovan et al., 2013; Mitchell et al., 2015), メンタルヘルスの改善 (Alcock et al., 2014; Wendelboe-Nelson et al., 2019; Lee et al., 2023; Klomp maker et al., 2019), 出生児への良い影響 (Hystad et al., 2014), COVID-19 の罹患防止 (Spotswood et al., 2021)
- **大気汚染**への曝露: 二酸化窒素 (NO₂) への曝露が, 慢性閉塞性肺疾患 (Zhang et al., 2018) のリスクに. 小児喘息・早産・肺がん・糖尿病リスク, 慢性閉塞性肺疾患のリスクに (Chen et al., 2022), 喘息の原因に (Bhattarai et al., 2024)
- **酷暑**への曝露: 酷暑への曝露は, 臓器や生殖機能などのさまざまな部位に悪影響 (Xu et al., 2025), 自殺や攻撃的言動の増加 (Bell et al., 2024). またこれらの論文では社会経済的脆弱性と heat exposure の関連についても指摘されている. 気温の上昇は疾患死亡率と疾患罹患率を高める (Yang et al., 2024)

屋外環境はオープンアクセスのように見えるけど

社会経済的地位による環境格差は、健康格差の一因
環境格差の実態を知ることは重要である



社会経済的地位が高い人ほど、**緑地**が多いところに居住している (Spotswood et al., 2021; Klompaker et al., 2023; Cui et al., 2022; Shen et al., 2017; Heo and Bell, 2023; Apparicio et al., 2016; Fernández and Wu, 2016). 社会経済的地位が高い人ほど、**大気汚染**が軽いところに居住しており (Rentschler and Leonova, 2023; Jbaily et al., 2022; Kashtan et al., 2024; Chakraborty et al., 2022; Fernández and Wu, 2016), 大気汚染に対して脆弱ではない (Geldsetzer et al., 2024; Bhattarai et al., 2024). 社会経済的地位が低い人ほど**酷暑**に曝露しやすい (Xu et al., 2025; Bell et al., 2024).

既存研究は「移動」を考慮していない

- 既存研究の多くは、居住地の環境のみに着目
 - ⇒ 日常的な移動を考慮することで、よりリアルな環境曝露を知ることができる可能性 (Yoo and Roberts, 2022)

移動を考慮した上での
環境格差を調べよう！！！！

先行研究のその他の課題

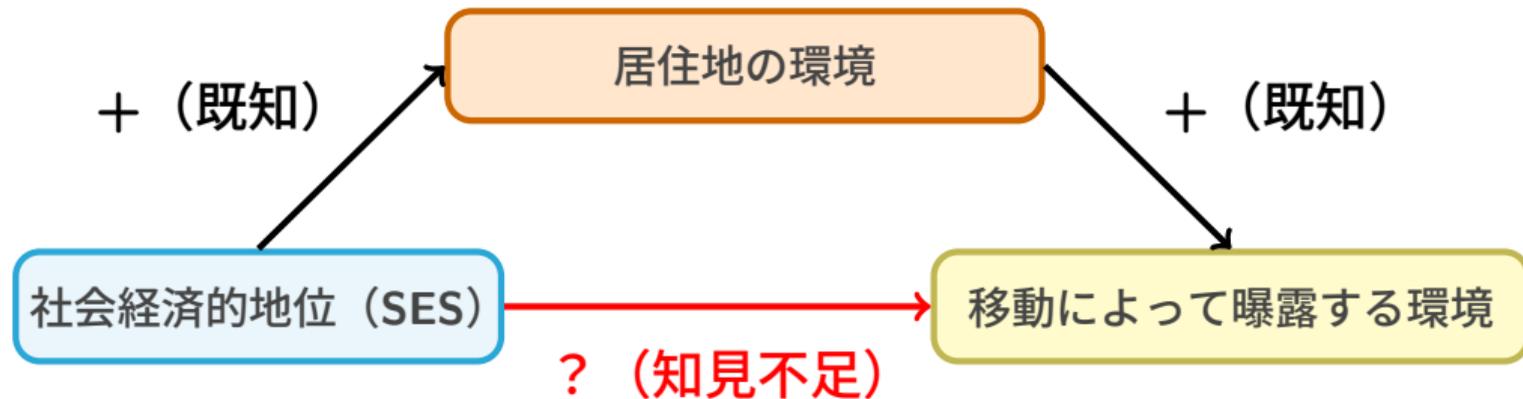
- 移動を考慮した既存研究もあるが、さまざまな課題
 - 移動データと環境データが収集された期間の不一致
 - データの解像度の粗さ
 - 日本における研究の蓄積（おそらくほぼない）

⇒ 本研究はこれらも解決！

移動を考慮した研究としては以下のようなものがある。コロナ禍での環境曝露パターンの変化 (Yin et al., 2024)。実験データと質問調査の統合 (Zheng et al., 2024)。静的な環境曝露と動的な動的曝露は似ている。社会人口学的特性とそれらの相関を分析 (Yoo and Roberts, 2022)。居住地ベースでは緑地曝露と健康の関連を過小評価している可能性 (Liu et al., 2025)。移動を介した環境曝露と社会経済地位の関連を分析し貧困やマイノリティは、環境ハザードへの曝露が大きいことを示唆 (Liu et al., 2023)。

先行研究の限界を超えて、知りたいこと

- 居住地の環境で統制しても、移動で曝露する環境には SES 格差あり？



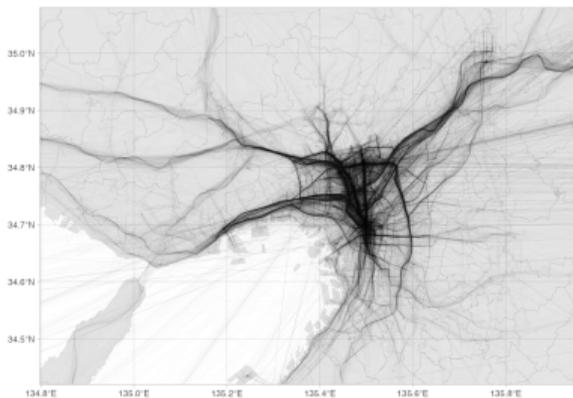
Yoo and Roberts (2022) は居住地の環境と移動によって曝露する環境は似ていることを明らかにした。Liu et al. (2023) は、移動によって曝露する環境は、居住地の環境にも影響されることを指摘している。Liu et al. (2023) は本研究のモチベーションに近い研究

CONTENTS

- 1 Research Background
- 2 Data and Methods
- 3 Results
- 4 Conclusion

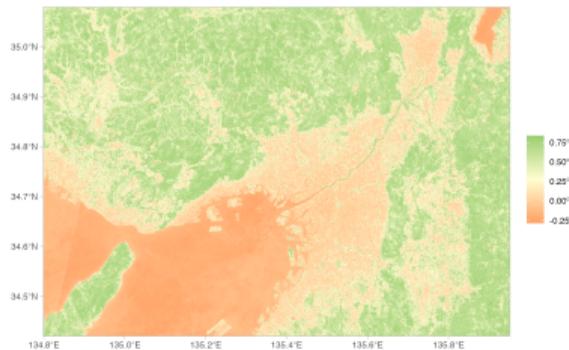
この研究では3つのデータを使用した

① スマホ位置情報 人流データ



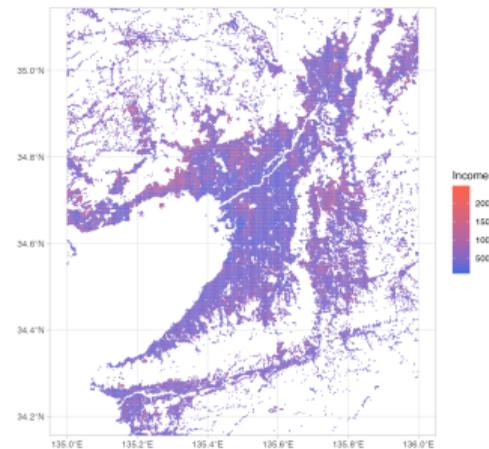
人の移動を把握

② 衛星画像



屋外環境を把握

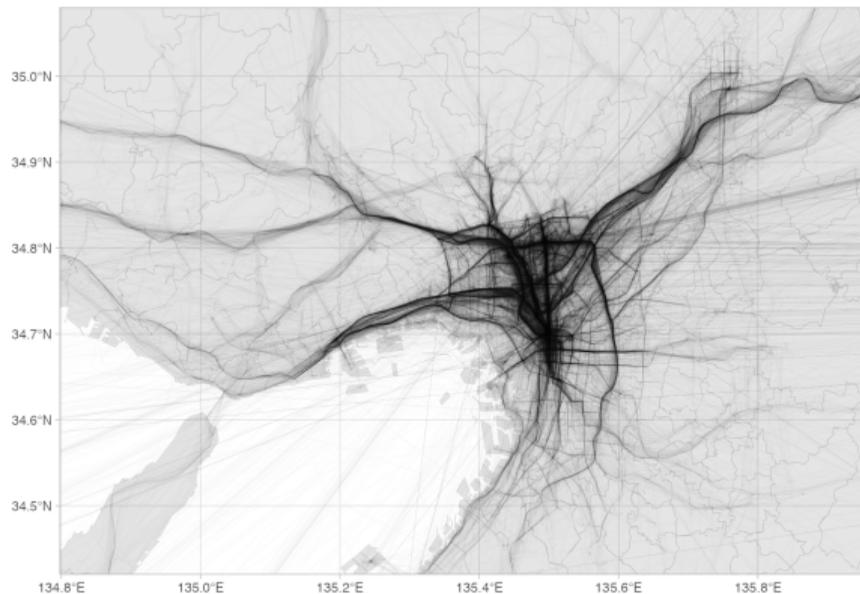
③ SES データ



所得や職業を把握

データ① - スマホ位置情報の人流データ

- 大阪府豊中市
- 2019年7月のデータ
- データはAgoop（株）より購入
- *scikit-mobility* を用いて前処理
 - ⇒ 居住地推定
 - ⇒ データの圧縮
 - ⇒ 滞在解析



ある日の人流の例

20 時間/日以上履歴があるもののみ使用した。1 日を通しての移動を知りたいため
また、大阪府豊中市を研究対象値としたのは、ひとつの市の中に多様な社会経済属性が混在しているため

データ② - 3つの衛星から4つの衛星画像

Sentinel-2



Sentinel-2 (source: ESA)

- 緑地量 (NDVI)
- 水域 (NDWI)

Sentinel-5p



Sentinel-5p (source: ESA)

- 二酸化窒素 (NO_2 ; nitrogen dioxide) 濃度

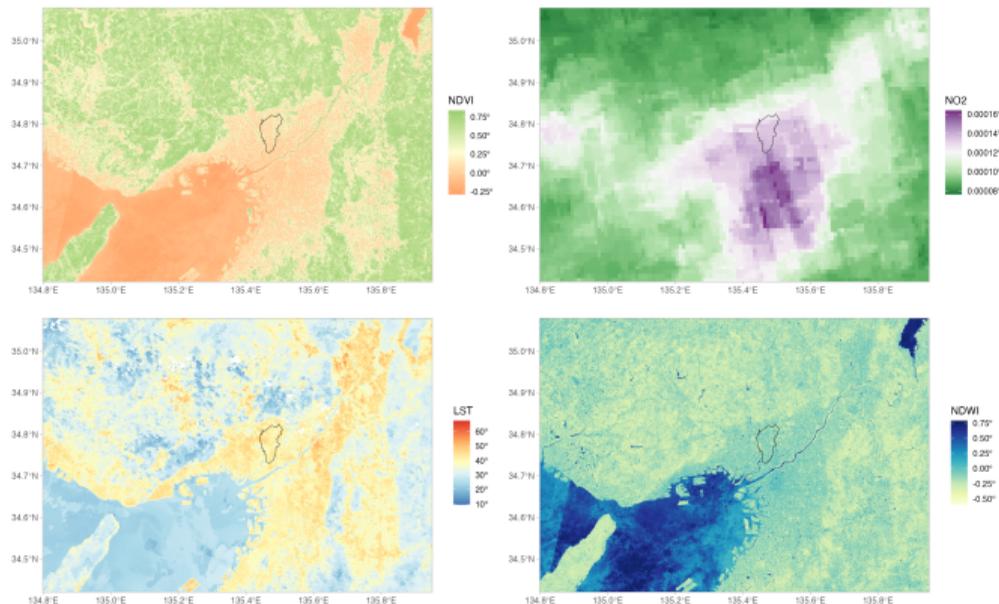
Landsat-8



Landsat-8 (source: NASA)

- 地表面温度 (LST; land surface temperature)

4種類の衛星画像，緑地，二酸化窒素，暑さ，水分量



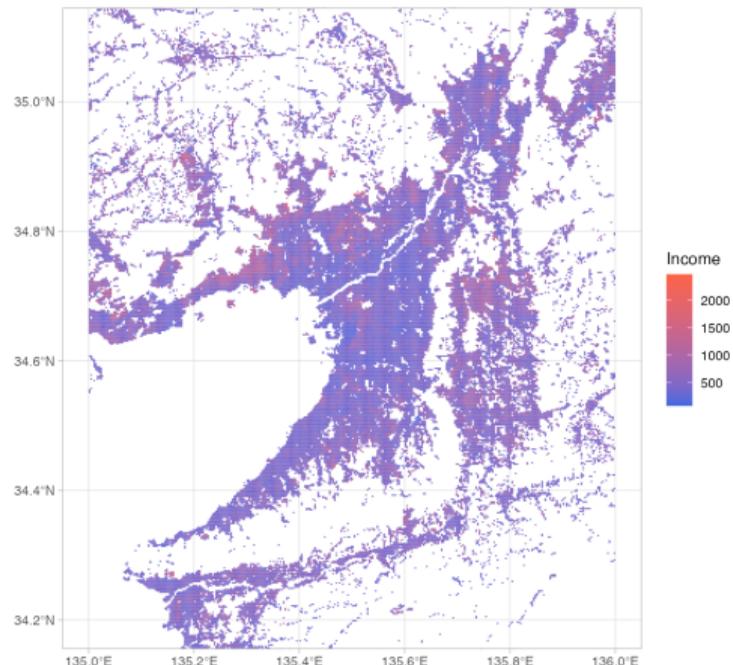
- 左上: **NDVI**: 緑地
2019年6月-8月の中央値
- 右上: **NO₂**: 二酸化窒素
2019年7月の中央値
- 左下: **LST**: 地表面温度
2018,19年の6/15-8/15の中央値
- 右下: **NDWI**: 水分量
2019年6月-8月の中央値

衛星画像はすべて分解能 20m にリサンプリング。処理は Google Earth Engine で行った

データ③ - 社会経済的地位として3つの変数

250m メッシュレベルの

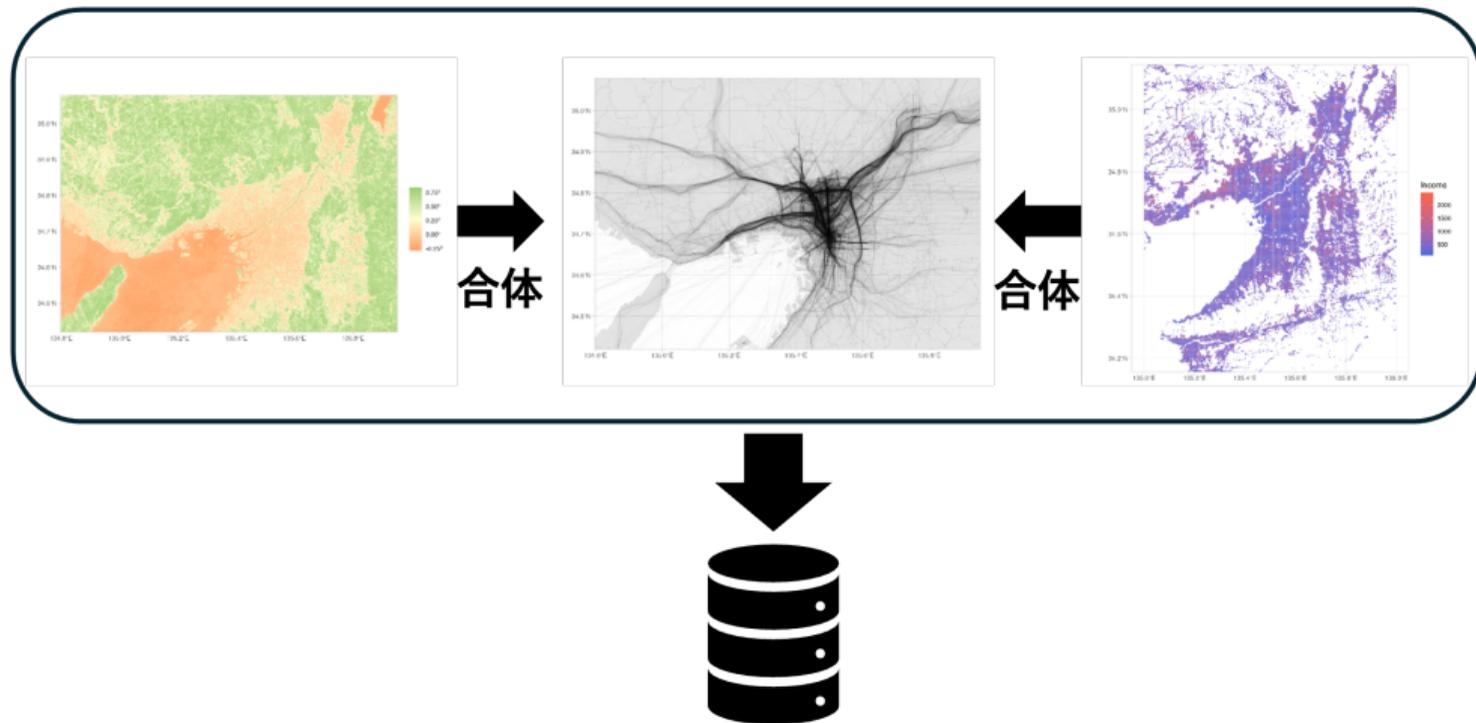
- 平均世帯所得（予測値）
- 高学歴（4大・院卒者）割合
- 派遣社員割合



平均世帯所得（予測値）

3個のデータを1個にまとめたい！

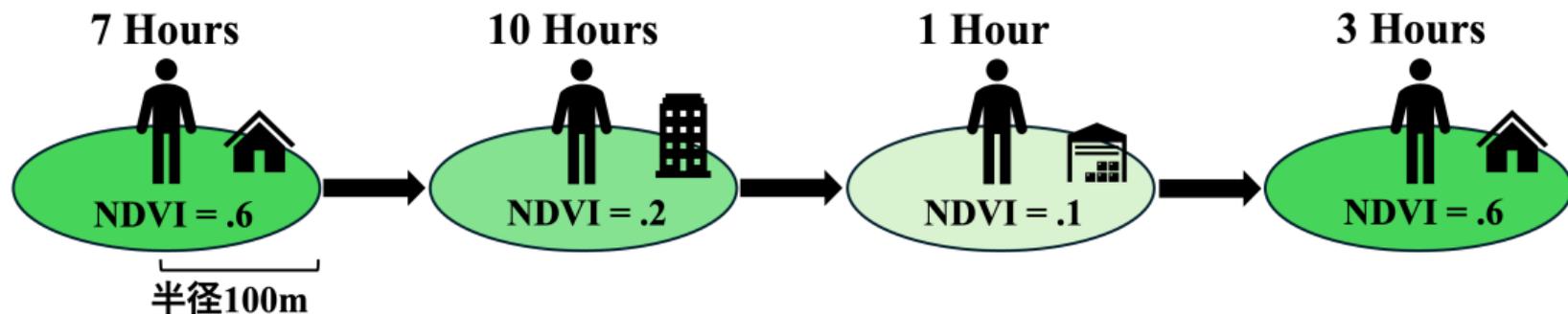
データをくっつけて、ひとつにまとめたい



人流データに衛星画像の環境情報をあつ

- 過ぎた地点の半径 100m における環境値の平均を計算
- 過ぎた時間をウェイトとした、環境値の加重平均を計算
- また、推定居住地半径 1000m 圏内の環境値の平均も計算

例) ある移動履歴の緑地 (NDVI) 曝露量の計算

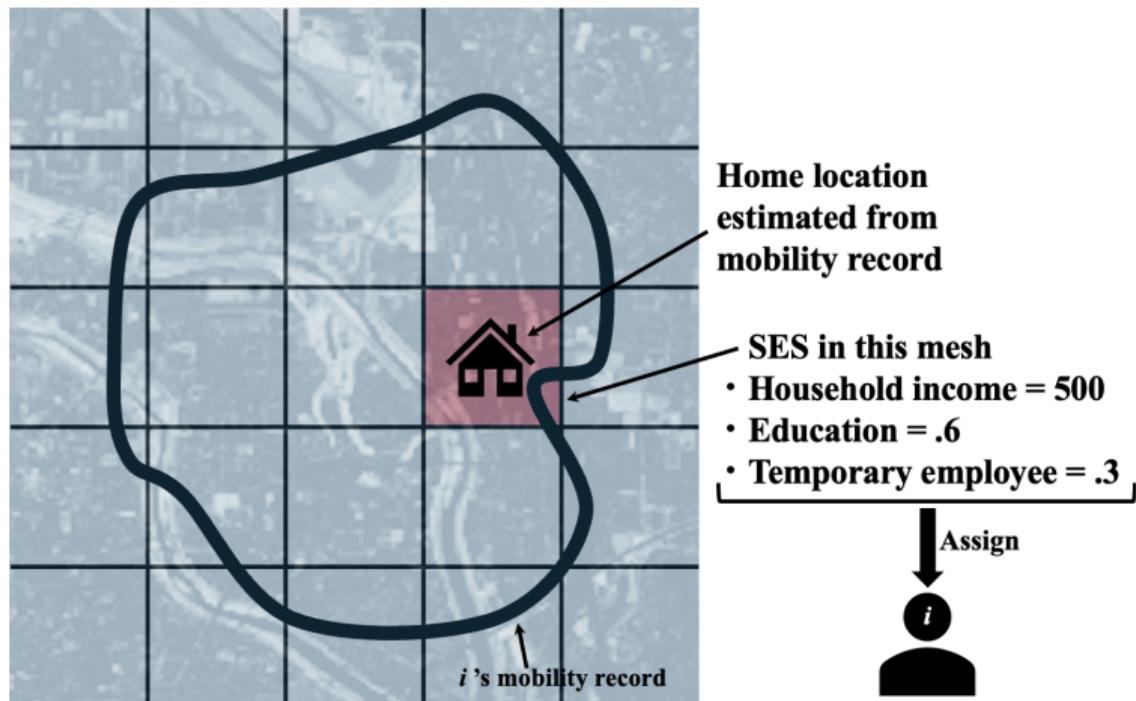


$$\text{Exposed NDVI} = \frac{(.6 \times 7) + (.2 \times 10) + (.1 \times 1) + (.6 \times 3)}{21} \sim .385$$

人流データと社会統計データの統合

- 推定居住地における社会経済的地位変数を、各人流に割り当てた
- ⇒ 個々人の世帯所得や学歴、職業地位の実測値ではない点に注意

右図) 任意の人流に社会経済的地位の値を割り当てるイメージ



記述統計 - データフレームの変数

$N = 46,785$, うち平日データ 74.1%, 休日データが 25.9%

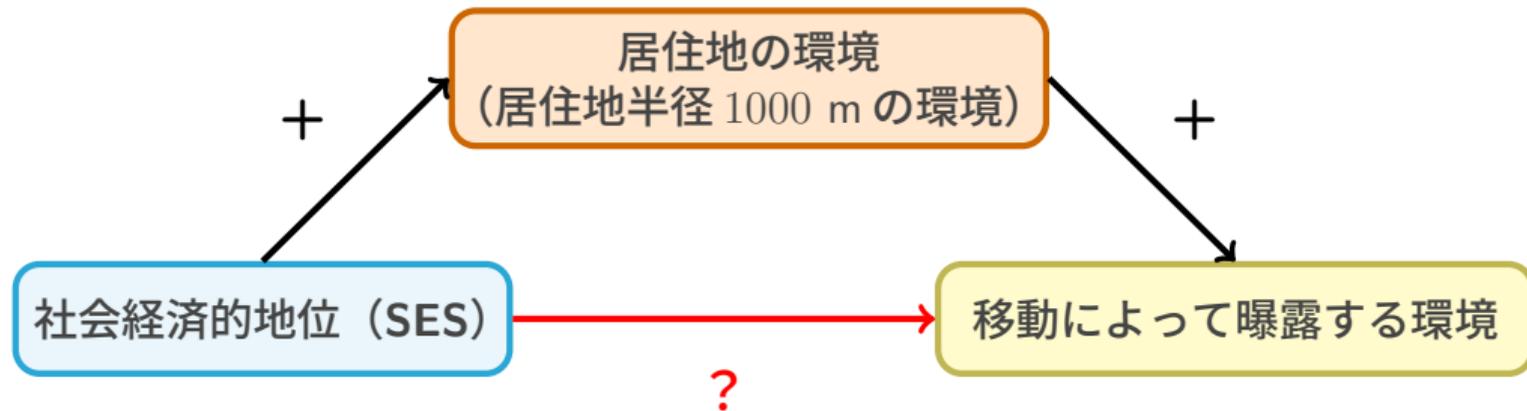
Variable	Unit	Mean	Std. Dev.	(Q1,Q3)
Environmental exposure				
NDVI (mobility - 移動)	—	9.96×10^{-2}	5.74×10^{-2}	$(5.81 \times 10^{-2}, 1.28 \times 10^{-1})$
NDVI (residence - 居住地)	—	1.35×10^{-1}	5.40×10^{-2}	$(8.96 \times 10^{-2}, 1.85 \times 10^{-1})$
NO ₂ (mobility - 移動)	mol/m ²	1.34×10^{-4}	6.02×10^{-6}	$(1.32 \times 10^{-4}, 1.37 \times 10^{-4})$
NO ₂ (residence - 居住地)	mol/m ²	1.33×10^{-4}	3.60×10^{-6}	$(1.32 \times 10^{-4}, 1.35 \times 10^{-4})$
LST (mobility - 移動)	°C	41.58	2.19	(40.15, 42.95)
LST (residence - 居住地)	°C	41.71	1.47	(40.80, 42.34)
NDWI (mobility - 移動)	-	-1.06×10^{-1}	3.53×10^{-2}	$(-1.28 \times 10^{-1}, -8.41 \times 10^{-2})$
NDWI (residence - 居住地)	-	-1.26×10^{-1}	1.80×10^{-2}	$(-1.40 \times 10^{-1}, -1.13 \times 10^{-1})$
Socioeconomic status				
Household income	10 ⁴ JPY	646.18	249.47	(458.44, 818.60)
Prop. Univ. Grad.	10 ⁻² %	.30	.11	(.22, .38)
Prop. Temp. Emp.	10 ⁻² %	.014	.005	(.010, .017)

CONTENTS

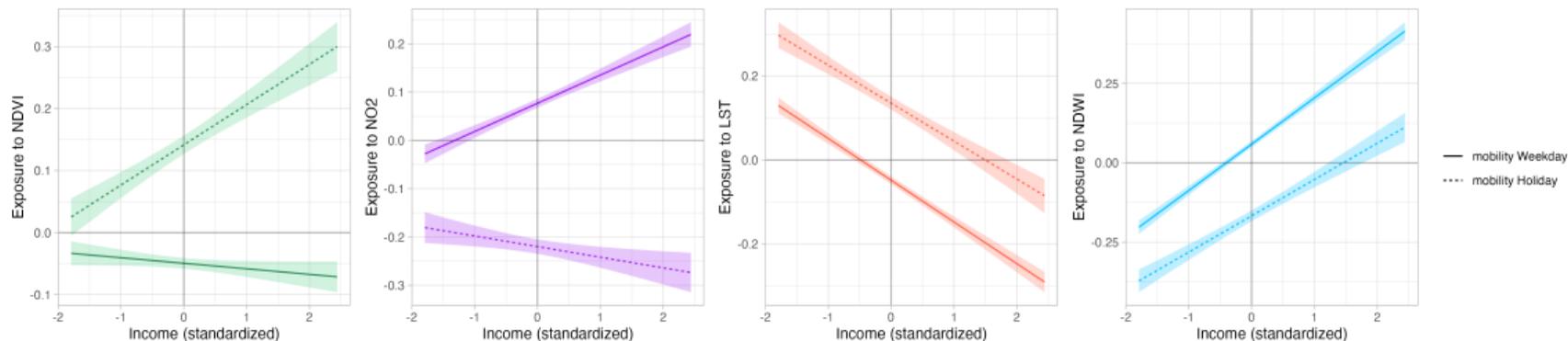
- 1 Research Background
- 2 Data and Methods
- 3 Results
- 4 Conclusion

なにを明らかにしたいか

居住地の環境をコントロールしてもなお、
高SES地域居住者ほど移動で良い環境に接触・曝露しているか？



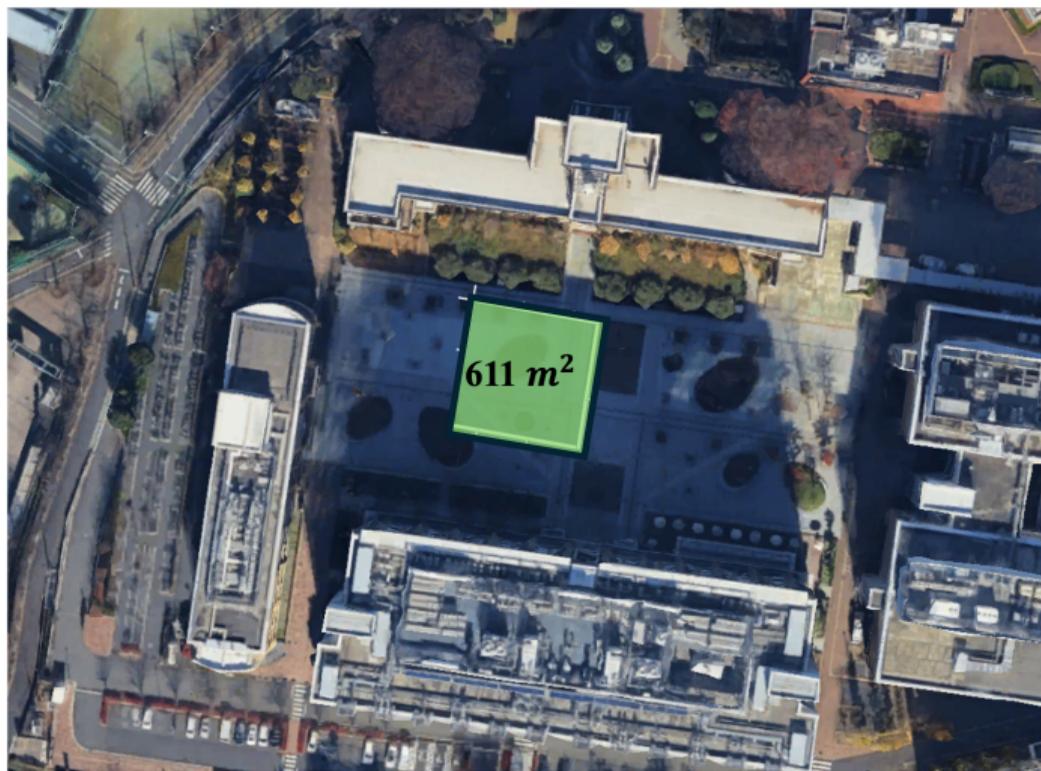
高所得エリア居住者は、移動によっていい環境にアクセス



居住地付近の緑地量をコントロールしたうえで、高所得地域居住者ほど、

- **移動によって曝露する緑地** ⇒ 平日: 少ない, 休日: 多い
- **移動によって曝露する二酸化窒素** ⇒ 平日: 少ない, 休日: 多い
- **移動によって曝露する地表面温度** ⇒ 平日も休日も低い
- **移動によって曝露する水辺** ⇒ 平日も休日も多い

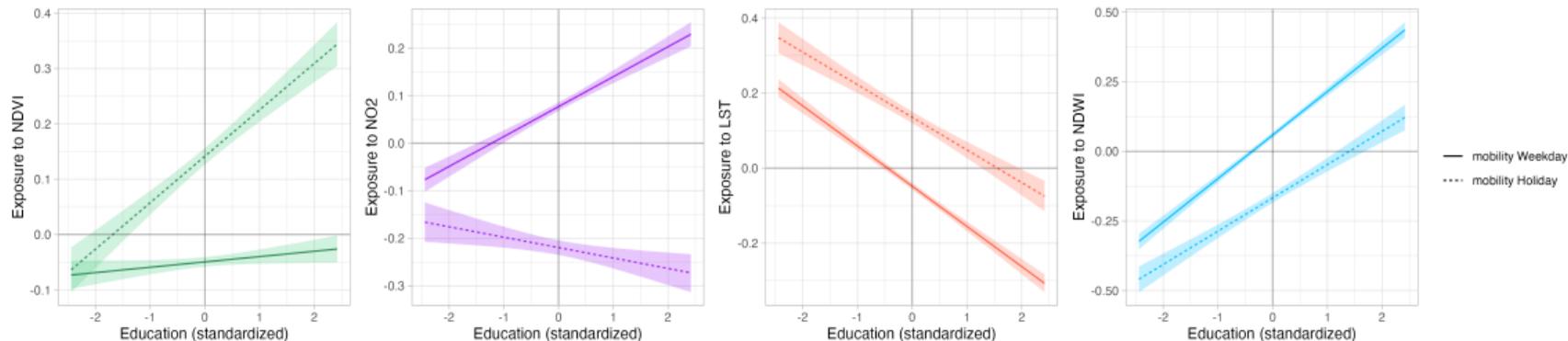
お金持ちエリア居住者は、どれくらい多く緑地に触れている？



お金持ちエリアの居住者は、
休日に移動によって 611 m^2
相当の森林に多く曝露^a

^a世帯所得 1260 万円のエリア居住者と
200 万円のエリア居住者との間には、滞在
半径 0.1 km 圏内に、これだけの量に相当す
る緑地の差があるということ

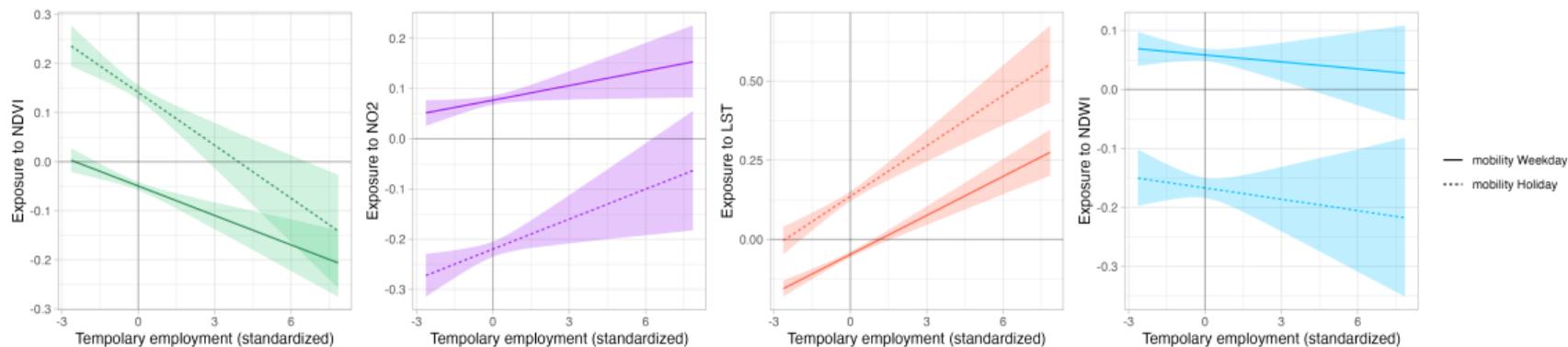
高学歴エリア居住者は、移動によっていい環境にアクセス



居住地付近の緑地量をコントロールしたうえで、高学歴地域居住者ほど、

- **移動によって曝露する緑地** ⇒ 平日も休日も多い
- **移動によって曝露する二酸化窒素** ⇒ 平日: 多い, 休日: 少ない
- **移動によって曝露する地表面温度** ⇒ 平日も休日も低い
- **移動によって曝露する水辺** ⇒ 平日も休日も多い

高派遣社員率エリア居住者は、移動によって悪い環境にアクセス



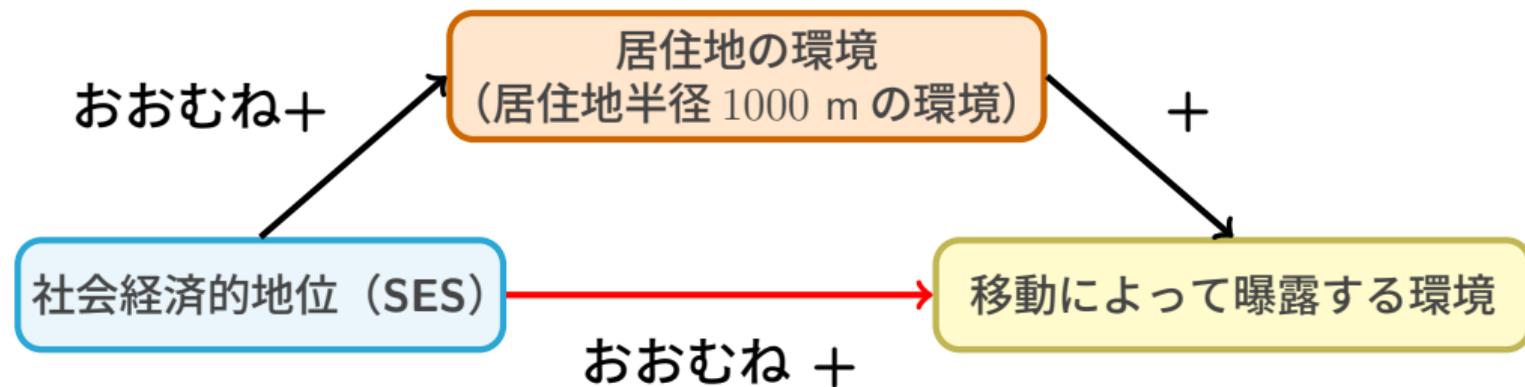
居住地付近の緑地量をコントロールしたうえで、派遣社員割合が大きい地域居住者ほど、

- **移動によって曝露する緑地** ⇒ 平日も休日も少ない
- **移動によって曝露する二酸化窒素** ⇒ 平日も休日も多い
- **移動によって曝露する地表面温度** ⇒ 平日も休日も高い
- **移動によって曝露する水辺** ⇒ 平日も休日も少ない (若干)

CONTENTS

- 1 Research Background
- 2 Data and Methods
- 3 Results
- 4 Conclusion

まとめ - 移動によって曝露する環境にも格差あり



社会経済的地位 (SES) → 移動によって曝露する環境

SES / 環境	緑地	綺麗な空気	涼しさ	水辺
世帯所得	平日 -, 休日 +	平日 -, 休日 +	+	+
教育水準	+	平日 -, 休日 +	+	+
非派遣社員	+	+	+	+

- ☆ 屋外環境はオープンアクセスのように見えるけど格差ある
- ☆ 環境格差を論じるには移動も考慮する必要
 - 他の地域，他の季節での分析 ⇒ 一般化可能性の高い結果
 - 屋外環境と屋内環境が識別できていない
 - SES 変数は，個人レベルの変数ではないことによるバイアス

References I

- Alcock, I., M. P. White, B. W. Wheeler, L. E. Fleming, and M. H. Depledge (2014, January). Longitudinal Effects on Mental Health of Moving to Greener and Less Green Urban Areas. Environmental Science & Technology 48(2), 1247–1255. Publisher: American Chemical Society.
- Apparicio, P., T.-T.-H. Pham, A.-M. Séguin, and J. Dubé (2016, November). Spatial distribution of vegetation in and around city blocks on the Island of Montreal: A double environmental inequity? Applied Geography 76, 128–136. Publisher: Elsevier BV.
- Bell, M. L., A. Gasparrini, and G. C. Benjamin (2024, May). Climate change, extreme heat, and health. N. Engl. J. Med. 390(19), 1793–1801.
- Bhattarai, K., L. Lamsal, M. Gyawali, S. Neupane, S. P. Gautam, A. Bakshi, and J. Yeager (2024, December). Impact of Nitrogen Dioxide (NO₂) Pollution on Asthma: The Case of Louisiana State (2005 – 2020). Atmosphere 15(12), 1472. Publisher: MDPI AG.
- Chakraborty, J., T. W. Collins, S. E. Grineski, and J. J. Aun (2022, June). Air pollution exposure disparities in US public housing developments. Scientific Reports 12(1). Publisher: Springer Science and Business Media LLC.
- Chen, Z., N. Liu, H. Tang, X. Gao, Y. Zhang, H. Kan, F. Deng, B. Zhao, X. Zeng, Y. Sun, H. Qian, W. Liu, J. Mo, X. Zheng, C. Huang, C. Sun, and Z. Zhao (2022, November). Health effects of exposure to sulfur dioxide, nitrogen dioxide, ozone, and carbon monoxide between 1980 and 2019: A systematic review and meta - analysis. Indoor Air 32(11). Publisher: Wiley.
- Cui, Q., Y. Huang, G. Yang, and Y. Chen (2022, August). Measuring Green Exposure Levels in Communities of Different Economic Levels at Different Completion Periods: Through the Lens of Social Equity. International Journal of Environmental Research and Public Health 19(15), 9611. Publisher: MDPI AG.
- Donovan, G. H., D. T. Butry, Y. L. Michael, J. P. Prestemon, A. M. Liebhold, D. Gatzolis, and M. Y. Mao (2013, February). The Relationship Between Trees and Human Health: Evidence from the Spread of the Emerald Ash Borer. American Journal of Preventive Medicine 44(2), 139–145.
- Fernández, I. C. and J. Wu (2016, September). Assessing environmental inequalities in the city of Santiago (Chile) with a hierarchical multiscale approach. Applied Geography 74, 160–169. Publisher: Elsevier BV.
- Geldsetzer, P., D. Fridljand, M. V. Kiang, E. Bendavid, S. Heft-Neal, M. Burke, A. H. Thieme, and T. Benmarhnia (2024, October). Disparities in air pollution attributable mortality in the US population by race/ethnicity and sociodemographic factors. Nature Medicine 30(10), 2821–2829. Publisher: Springer Science and Business Media LLC.
- Heo, S. and M. L. Bell (2023, March). Investigation on urban greenspace in relation to sociodemographic factors and health inequity based on different greenspace metrics in 3 US urban communities. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology 33(2), 218–228. Publisher: Springer Science and Business Media LLC.

References II

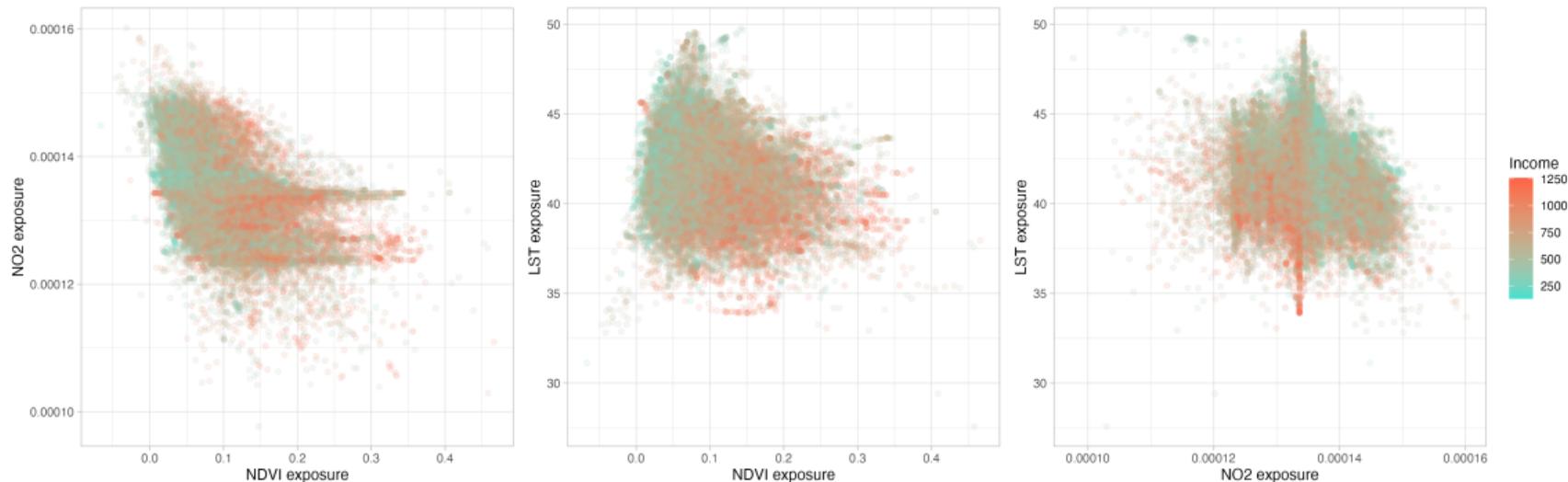
- Hystad, P., H. W. Davies, L. Frank, J. Van Loon, U. Gehring, L. Tamburic, and M. Brauer (2014, October). Residential Greenness and Birth Outcomes: Evaluating the Influence of Spatially Correlated Built-Environment Factors. Environmental Health Perspectives 122(10), 1095–1102. Publisher: Environmental Health Perspectives.
- James, P., J. E. Hart, R. F. Banay, and F. Laden (2016, September). Exposure to Greenness and Mortality in a Nationwide Prospective Cohort Study of Women. Environmental Health Perspectives 124(9), 1344–1352. Publisher: Environmental Health Perspectives.
- Jbaily, A., X. Zhou, J. Liu, T.-H. Lee, L. Kamareddine, S. Verguet, and F. Dominici (2022, January). Air pollution exposure disparities across US population and income groups. Nature 601(7892), 228–233. Publisher: Springer Science and Business Media LLC.
- Kashtan, Y., M. Nicholson, C. J. Finnegan, Z. Ouyang, A. Garg, E. D. Lebel, S. T. Rowland, D. R. Michanowicz, J. Herrera, K. C. Nadeau, and R. B. Jackson (2024, May). Nitrogen dioxide exposure, health outcomes, and associated demographic disparities due to gas and propane combustion by U.S. stoves. Science Advances 10(18). Publisher: American Association for the Advancement of Science (AAAS).
- Klomp maker, J. O., J. E. Hart, C. R. Bailey, M. H. Browning, J. A. Casey, J. R. Hanley, C. T. Minson, S. S. Ogletree, A. Rigolon, F. Laden, and P. James (2023, January). Racial, Ethnic, and Socioeconomic Disparities in Multiple Measures of Blue and Green Spaces in the United States. Environmental Health Perspectives 131(1). Publisher: Environmental Health Perspectives.
- Klomp maker, J. O., G. Hoek, L. D. Bloemsma, A. H. Wijga, C. van den Brink, B. Brunekreef, E. Lebret, U. Gehring, and N. A. H. Janssen (2019, August). Associations of combined exposures to surrounding green, air pollution and traffic noise on mental health. Environ. Int. 129, 525–537.
- Lee, K. O., K. M. Mai, and S. Park (2023, February). Green space accessibility helps buffer declined mental health during the COVID-19 pandemic: evidence from big data in the United Kingdom. Nature Mental Health 1(2), 124–134. Publisher: Springer Science and Business Media LLC.
- Liu, Y., M.-P. Kwan, L. Song, C. Yu, and Y. Cui (2025, August). How mobility-based exposure measures may mitigate the underestimation of the association between green space exposures and health. Social Science & Medicine 379, 118190. Publisher: Elsevier BV.
- Liu, Z., C. Liu, and A. Mostafavi (2023, October). Beyond Residence: A Mobility-based Approach for Improved Evaluation of Human Exposure to Environmental Hazards. Environmental Science & Technology 57(41), 15511–15522. Publisher: American Chemical Society (ACS).
- Mitchell, R. J., E. A. Richardson, N. K. Shortt, and J. R. Pearce (2015, July). Neighborhood Environments and Socioeconomic Inequalities in Mental Well-Being. American Journal of Preventive Medicine 49(1), 80–84. Publisher: Elsevier BV.

References III

- Rao, M., L. A. George, T. N. Rosenstiel, V. Shandas, and A. Dinno (2014, November). Assessing the relationship among urban trees, nitrogen dioxide, and respiratory health. Environmental Pollution 194, 96–104. Publisher: Elsevier BV.
- Rentschler, J. and N. Leonova (2023, July). Global air pollution exposure and poverty. Nature Communications 14(1). Publisher: Springer Science and Business Media LLC.
- Shen, Y., F. Sun, and Y. Che (2017, October). Public green spaces and human wellbeing: Mapping the spatial inequity and mismatching status of public green space in the Central City of Shanghai. Urban Forestry & Urban Greening 27, 59–68.
- Spotswood, E. N., M. Benjamin, L. Stoneburner, M. M. Wheeler, E. E. Beller, D. Balk, T. McPhearson, M. Kuo, and R. I. McDonald (2021, October). Nature inequity and higher COVID-19 case rates in less-green neighbourhoods in the United States. Nature Sustainability 4(12), 1092–1098. Publisher: Springer Science and Business Media LLC.
- Takano, T. (2002, December). Urban residential environments and senior citizens' longevity in megacity areas: the importance of walkable green spaces. Journal of Epidemiology & Community Health 56(12), 913–918. Publisher: BMJ.
- Wendelboe-Nelson, C., S. Kelly, M. Kennedy, and J. Cherrie (2019, June). A Scoping Review Mapping Research on Green Space and Associated Mental Health Benefits. International Journal of Environmental Research and Public Health 16(12), 2081. Publisher: MDPI AG.
- Xu, J., Q. Wang, O. Anikeeva, P. Zhu, P. Bi, and C. Huang (2025, October). Effects of extreme heat on physiology, morbidity, and mortality under climate change: mechanisms and clinical implications. BMJ 391, e084675.
- Yang, X., X. Xu, Y. Wang, J. Yang, and X. Wu (2024, October). Heat exposure impacts on urban health: A meta-analysis. Sci. Total Environ. 947(174650), 174650.
- Yin, X., Y. Song, L. Zhang, L. Hu, D. Li, Z. Liu, and F. Li (2024, January). A Dynamic Assessment of Disparities in Greenspace Exposure from a Time and Age Perspective: Comparing Lockdown and Non-Lockdown Periods. Ecosystem Health and Sustainability 10. Publisher: American Association for the Advancement of Science (AAAS).
- Yoo, E.-h. and J. E. Roberts (2022, April). Static home-based versus dynamic mobility-based assessments of exposure to urban green space. Urban Forestry & Urban Greening 70, 127528. Publisher: Elsevier BV.
- Zhang, Z., J. Wang, and W. Lu (2018, May). Exposure to nitrogen dioxide and chronic obstructive pulmonary disease (COPD) in adults: a systematic review and meta-analysis. Environmental Science and Pollution Research 25(15), 15133–15145. Publisher: Springer Science and Business Media LLC.
- Zheng, L., M.-P. Kwan, Y. Liu, D. Liu, J. Huang, and Z. Kan (2024, October). How mobility pattern shapes the association between static green space and dynamic green space exposure. Environmental Research 258, 119499. Publisher: Elsevier BV.

集計結果 - それぞれの環境曝露の関係

- 緑地曝露が多い人は、二酸化窒素への曝露が小さい (Rao et al. (2014) の知見と整合)

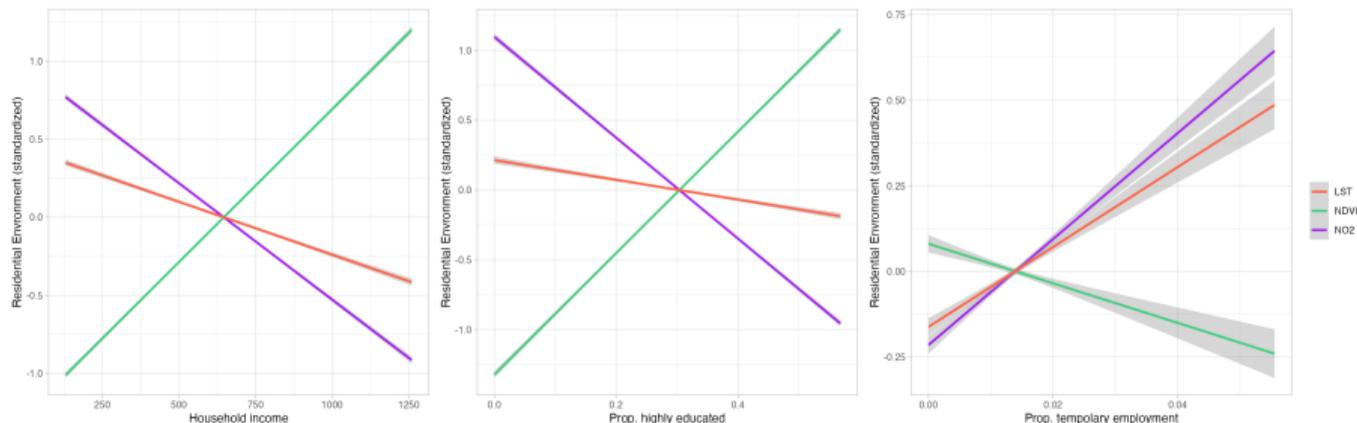


記述統計 - 社会経済的地位と居住地環境の関連

社会経済的地位 (SES)

+

居住地の環境
(緑地↑・汚染↓・暑さ↓)



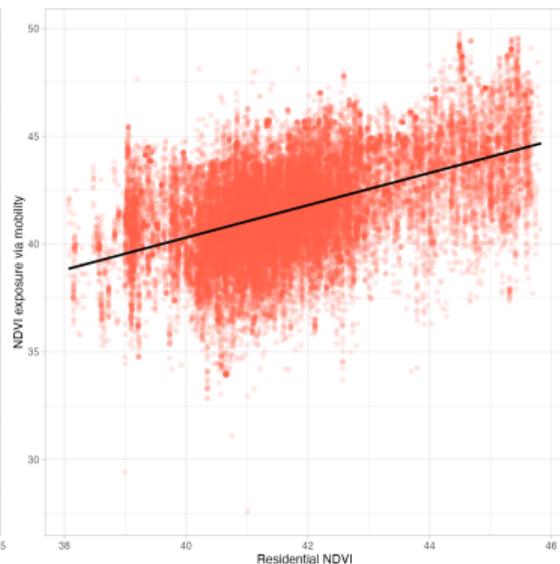
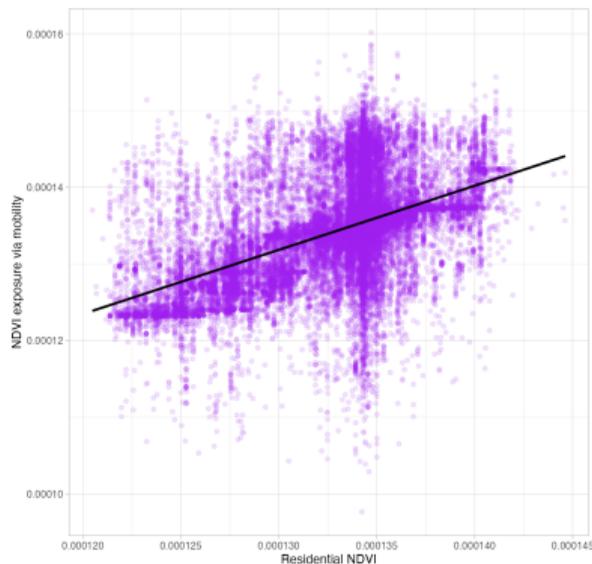
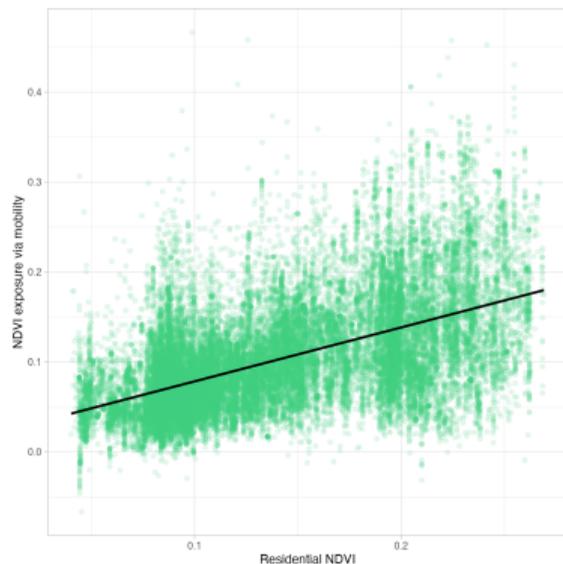
高SESほど、居住地の環境が良い

記述統計 - 移動によって曝露する環境 vs. 居住地環境の関連

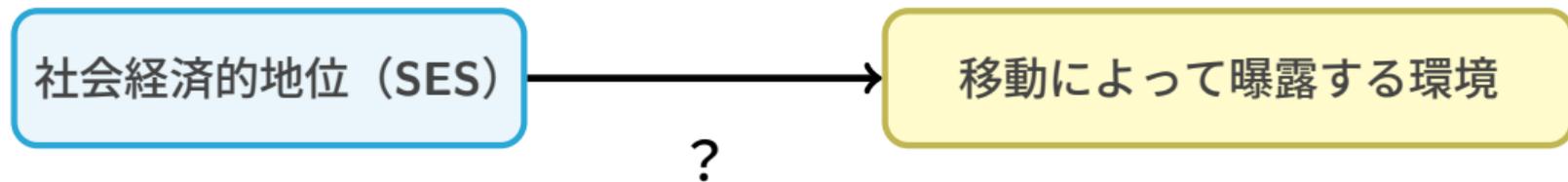
居住地の環境
(緑地↑・汚染↓・暑さ↓)

+

移動によって曝露する環境
(緑地↑・汚染↓・暑さ↓)

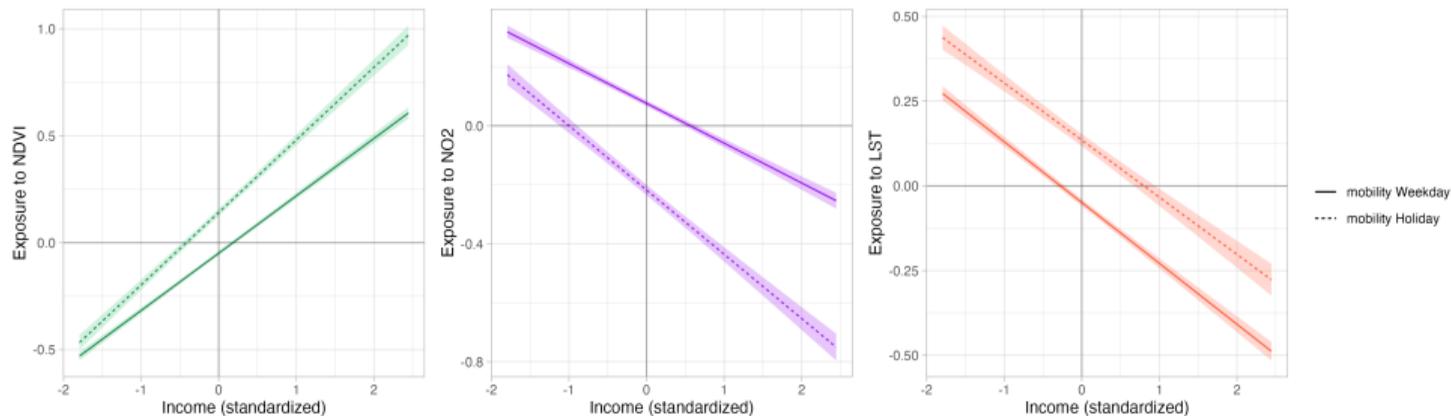


社会経済的地位は、移動によって曝露する環境と
どのように結びついているのか？



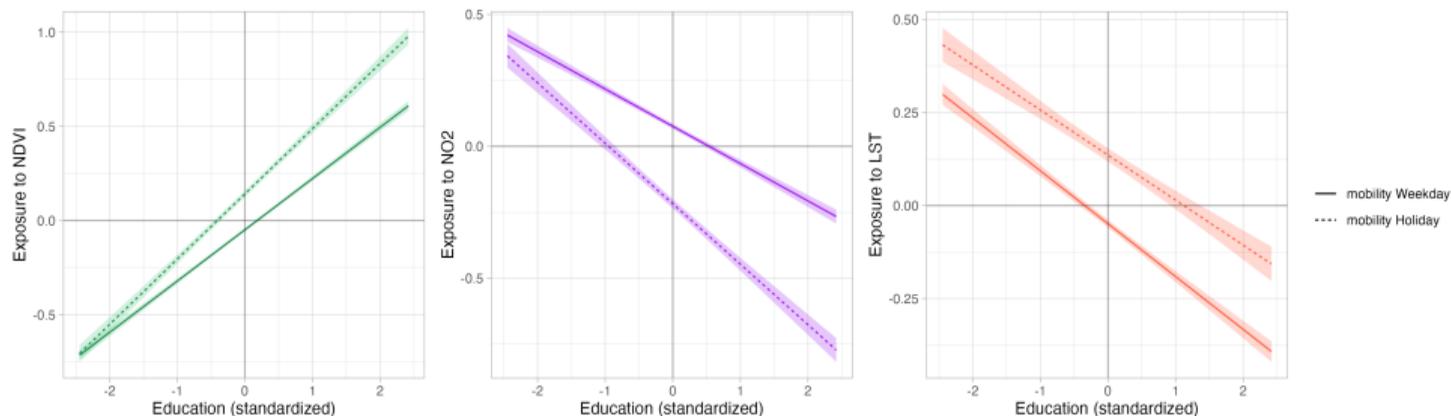
$$\text{Environmental Exposure} \sim \text{SES} \times D_{\text{Hoiday}}$$

分析① - 世帯所得→環境曝露 - 総効果



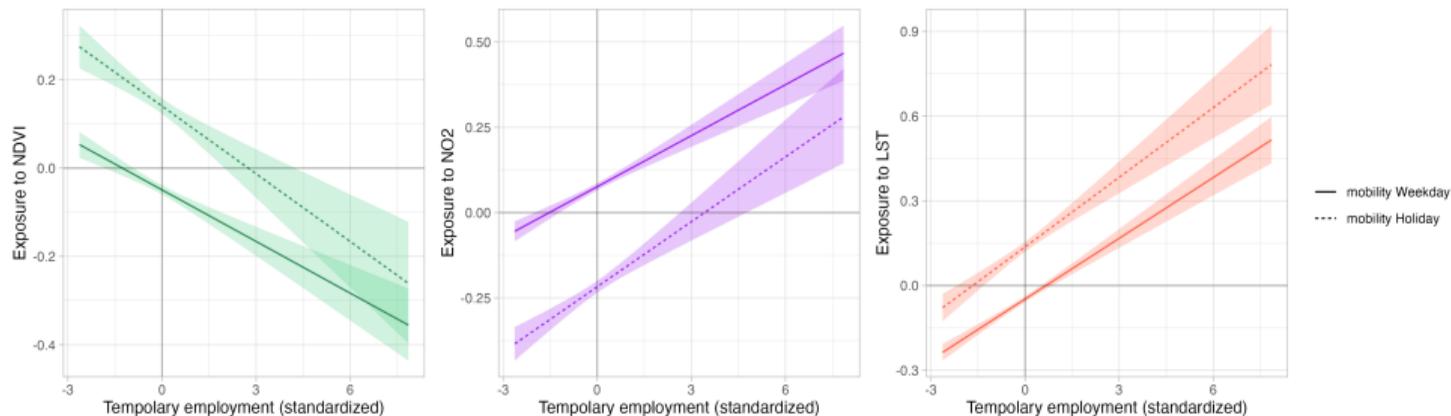
- 高世帯所得地域に住んでいる人ほど，平日・休日ともに，より良い環境（NDVI ↑，NO₂ ↓，LST ↓）に曝露している

分析① - 教育水準→環境曝露 - 総効果



- 高学歴地域に住んでいる人ほど，平日・休日ともに，より良い環境 (NDVI ↑，NO₂ ↓，LST ↓) に曝露している

分析① - 派遣社員→環境曝露 - 総効果



- 派遣社員割合が多い地域に住んでいる人ほど，平日・休日ともに，より悪い環境（NDVI ↓，NO₂ ↑，LST ↑）に曝露している

ちなみに、総効果のうち直接効果はどのくらい？



Coefficient	NDVI			NO ₂			LST			NDWI		
	β	γ	β/γ	β	γ	β/γ	β	γ	β/γ	β	γ	β/γ
Weekdays												
世帯所得	-0.009	.271	-.033	.058	-.139	-.417	-.099	-.181	.547	.146	.056	2.61
学歴	.010	.274	.036	.063	-.145	-.434	-.107	-.143	.748	.156	.069	2.26
派遣社員率	-.020	-.034	.588	.010	.048	.208	.041	.072	.569	-.004	-.007	.571
Holidays												
世帯所得	.065	.340	.191	-.022	-.221	.010	-.090	-.170	.529	.114	.026	4.38
学歴	.084	.346	.243	-.022	-.232	.095	-.087	-.123	.707	.120	.033	3.64
派遣社員率	-.036	-.045	.800	.020	.060	.333	.053	.084	.631	-.006	-.010	.600