

# 日本国内航空輸送ネットワーク上の 流量と社会ストックとの関係

佐藤 彰洋 \*

京都大学 大学院情報学研究科 数理工学専攻

澤井 秀文

情報通信研究機構

## 概要

本研究では、国土交通省総合政策局 2012 年航空輸送統計と総務省統計局 2010 年国勢調査 3 次メッシュデータおよび空港の位置情報を用いることにより、重力モデルの係数をもっとも説明力の高い空港周辺人口距離の推定を行った。推定の結果、旅客輸送人員に対して空港間距離は説明変数として有意でない一方で、貨物輸送量に対しては空港間距離は有意な説明力を有し、流量は距離に対して正相関であった。また、もっとも説明力の高い空港周辺人口として旅客輸送人員に対して 24km, 貨物輸送量に対して 23km を得た。

## 1 はじめに

航空機ネットワーク上における 2 地点間の移動量はどのような傾向にあるのであろうか？また、移動の活発な地域の経済活動は活発なのだろうか？

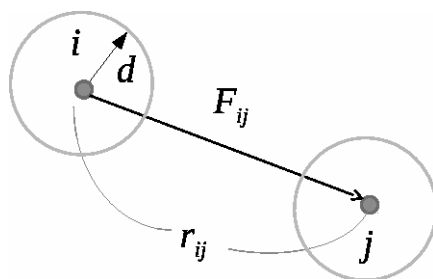


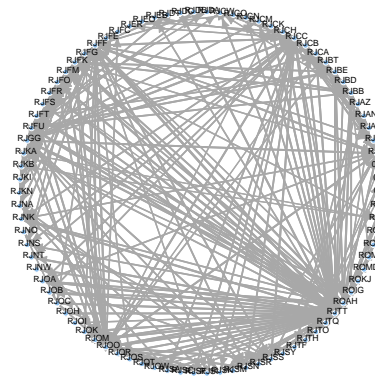
図 1: 重力モデルの概念図.

Zipf(1946) [1] は、重力モデル (gravity model) と呼ばれる 2 地点間の人の移動と移動する場所の人口に関する仮説を提案している。これをより拡張した重力モデルが近年用いらるようになっている。これは、図 1 に示すように 2 地点間の人の移動量  $F_{ij}$  が出発地点  $i$  の周辺  $d$ [km] 内人口  $x_i(d)$  と到着地点  $j$  の周辺  $d$ [km] 内人口  $x_j(d)$  および  $i$  と  $j$  との距離  $r_{ij}$  を用いて

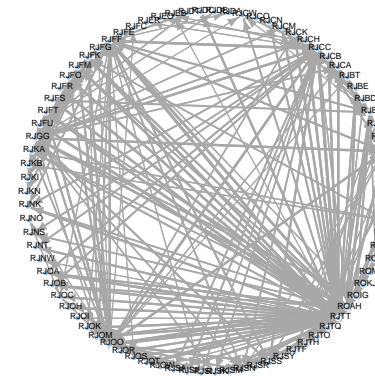
$$F_{ij} = cx_i^{\beta_1}(d)x_j^{\beta_2}(d)r_{ij}^{\beta_3} \quad (1)$$

として定式化するモデルである。さらに、radiation model ではより高精度のフィッティングが可能である [2].

\* 〒 606-8501, 京都市左京区吉田本町, TEL:075-753-5515, FAX:075-753-4919, E-mail:aki@i.kyoto-u.ac.jp



(a)



(b)

図 2: 国土交通省 2012 年航空輸送統計の年間旅客輸送量をもとに描いた日本の国内線航空輸送ネットワーク. (a) 旅客, (b) 貨物.

(1) 式は, 地点  $i$  から  $j$  への流量  $F_{ij}$  の対数が人口と距離の対数に対して線形性

$$\ln F_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \ln x_i(d) + \beta_2 \ln x_j(d) + \beta_3 \ln r_{ij} \quad (2)$$

を仮定しており, 二乗誤差  $E$  を最小とするパラメータを求めることによりパラメータ  $(d, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3)$  を決定することができる.

$$E(d, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3) = \sum_{i,j, F_{ij} \neq 0} \left[ \ln F_{ij} - \beta_0 - \beta_1 \ln x_i(d) - \beta_2 \ln x_j(d) - \beta_3 \ln r_{ij} \right]^2 \quad (3)$$

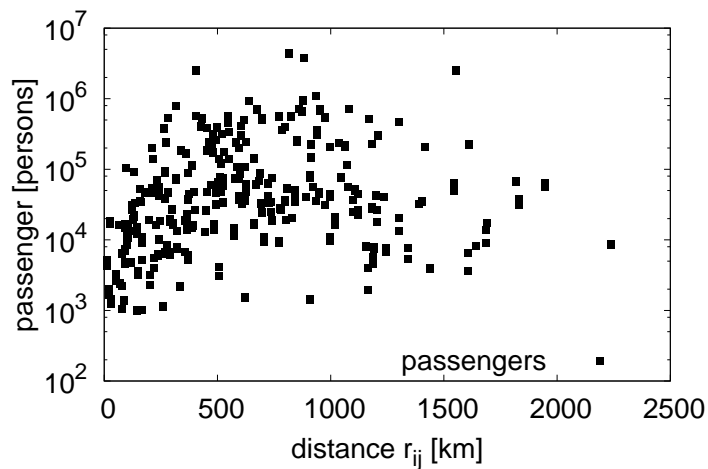
$$(d^*, \hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3) = \arg \min_{d, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3} E(d, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3) \quad (4)$$

## 2 データと分析結果

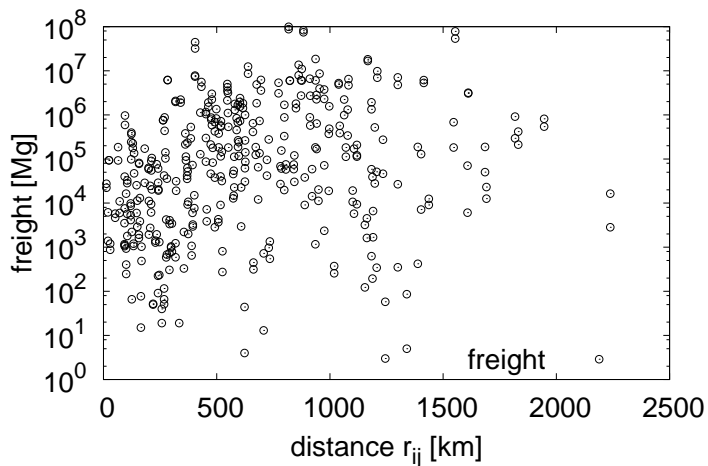
本研究では日本の航空輸送統計を用いて, 重力モデルの回帰係数および説明変数として利用する空港周辺人口を推定するための適切な距離  $d$  を求めることを行った. 重力モデルの係数を計算するために, 総務省統計局が公表している 2010 年国勢調査 3 次メッシュデータ (1km メッシュ) [3], および, 国土交通省総合政策局情報政策課が公表している 2012 年航空輸送統計 [4] と日本 86 空港の緯度, 経度と高度を含む位置データを用いて分析を行った.

表 1 は, 2010 年航空輸送統計に含まれている 86 空港の空港コード (IATA, ICAO) と位置とを表す. 日本国内に空港が偏在している.

図 2(a) は国土交通省 2012 年航空輸送統計の 1 年間の旅客輸送量を元に描いた, 国内線旅客移動ネットワークである. 平均出次数は 5.372093, 平均入次数は 5.372093 であり, 平均クラスタ係数 0.469923, 大域的クラスタ係数 0.205842, 次数相関は -0.436594, 平均経路長は 2.473598 である. また, 図 2(b) は, 2012 年 1 年間での貨物輸送量を元に描いた国内線貨物移動ネットワークである. 平均出次数は 4.804878, 平均入次数は 4.804878, 平均クラスタ係数 0.487389, 大域的クラスタ係数 0.191510, 次数相関 -0.468332, 平均経路長 2.494731 であった. このことから, 国内航空輸送ネット



(a)



(b)

図 3: 空港間距離に対する年間旅客輸送量と貨物輸送量との関係. (a) 旅客輸送人員と空港間距離との関係. (b) 貨物輸送量と空港間距離との関係

ワークの構造は旅客輸送と貨物輸送とて若干異なっていることが理解される. 表 2 は旅客輸送人員と貨物輸送量とでそれぞれ次数の高い上位 10 空港である. 国内線では東京羽田空港 (RJTT) が最大次数であり, ついで, 那覇空港 (ROAH), 大阪伊丹空港 (RJOO), 札幌新千歳空港 (RJCC) が旅客および貨物両方で 2 位, 3 位, 4 位と続く.

空港間の距離  $r_{ij}$  と旅客移動量および貨物移送量との関係を図 3 に示す. 500km 以下では旅客輸送人員が  $10^3$  人/年から  $10^5$  人/年程度だが, 1000km 前後では  $10^6$  から  $10^7$  人/年に達する場合がある. 1000km 以上ではこの傾向は, 同等あるいは若干減少する傾向がある. 貨物輸送量に対しては, 500km 以下までの貨物移送量は  $10^5$  から  $10^6$  Mg/年であるが 1000km 前後では  $10^8$  Mg/年に達する経路が存在している. 1000km 以上離れた空港間での貨物輸送量は若干減少する傾向が旅客輸送人員同様に認められる.

図 4 は総務省統計局が公表している 2010 年国勢調査 3 次メッシュデータを図示したものである. 日本の国土  $377,900\text{km}^2$  に対して 1 人以上の人が暮らす面積は  $180,218\text{km}^2$  と見積もられる. この 3 次メッシュデータに含まれる総人口は 128,057,346 人である. この 3 次メッシュデータから空港

表 1: 国土交通省 2012 年航空輸送統計に含まれる 86 空港のコードと位置.

JPname	IATA	ICAO	longitude (°)	latitude (°)	altitude (m)	pop15km	pop30km	pop50km	pop100km
佐賀	HSG	RJFS	130.302002	33.149700	1.828800	365086	1286956	4088315	9048242
岩国	IWK	RJOI	132.235992	34.143902	2.133600	151155	613593	2203328	4868971
那覇	OKA	ROAH	127.646004	26.195801	3.657600	768779	1134699	1175556	1284700
中部	NGO	RJGG	136.804993	34.858398	4.572000	335851	2679466	7828213	15701448
長崎	NGS	RJFU	129.914001	32.916901	4.572000	306061	967350	1686923	7002789
出雲	IZO	RJOC	132.889999	35.413601	4.572000	183661	436979	729165	1364487
仙台	SDJ	RJSS	140.917007	38.139702	4.572000	666579	1603150	2130473	4369094
徳之島	TKN	RJKN	128.880997	27.836399	5.181600	11773	25587	27654	103896
大分	OIT	RJFO	131.737000	33.479401	5.791200	43342	329736	902323	4420084
米子	YGJ	RJOH	133.235992	35.492199	6.096000	248410	472244	717005	1624426
宮崎	KMI	RJFM	131.449005	31.877199	6.096000	365066	521525	874329	2361524
喜界島	KKX	RJKI	129.927994	28.321301	6.400800	8169	13407	59606	73939
北九州	KKJ	RJFR	131.035004	33.845901	6.400800	414660	1605202	2618122	7753088
神戸	UKB	RJBE	135.223999	34.632801	6.705600	1239811	7714653	14563952	20954777
久米島	UEO	ROKJ	126.713997	26.363501	7.010400	8519	8519	8971	385424
山口宇部	UBJ	RJDC	131.279007	33.930000	7.010400	226744	531192	2005887	7031175
松山	MYJ	RJOM	132.699997	33.827202	7.620000	585446	666683	1253417	5378793
丘珠	OKD	RJCO	141.380005	43.116100	7.620000	1969772	2295983	2673071	3414939
関西	KIX	RJBB	135.244003	34.427299	7.924800	540857	3113893	12420007	20655102
徳島	TKS	RJOS	134.606995	34.132801	7.924800	403776	699312	1059787	11700002
奄美	ASJ	RJKA	129.712997	28.430599	8.229600	11084	57771	65450	75343
新潟	KIJ	RJSN	139.121002	37.955898	8.839200	555998	1013106	1387570	2548166
稚内	WKJ	RJCV	141.800995	45.404202	9.144000	38088	42320	51689	83647
福岡	FUK	RJFF	130.451004	33.585899	9.753600	2005950	2932290	5064839	8784752
東京	HND	RJTT	139.779999	35.552299	10.668000	3770320	17853073	31604717	39852168
金沢	KMQ	RJNK	136.406998	36.394600	10.972800	232830	792372	1466882	3029234
多岐間	TRA	RORT	124.675003	24.653900	10.972800	1231	1231	2243	103404
巻岐	IKI	RJDB	129.785004	33.749001	12.496800	29207	45985	362075	5762484
高知	KCZ	RJOK	133.669006	33.546101	12.801600	362687	544528	684385	3469332
大阪	ITM	RJOO	135.438004	34.785500	15.240000	4566066	10548426	16409549	21068047
名古屋	NKM	RJNA	136.923996	35.255001	15.849600	2933065	6388424	8927031	13639014
与論	RNK	RORY	128.401993	27.044001	15.849600	5327	5749	28143	431002
鳥取	TTJ	RJOR	134.167007	35.530102	19.812000	187392	267407	431051	2976715
三宅島	MYE	RJTQ	139.559998	34.073601	20.421600	2676	3024	7796	93267
与那国	OGN	ROYN	122.977997	24.466900	21.336000	1657	1657	1657	4478
北大東島	KTD	RORK	131.326996	25.944700	24.384000	963	2107	2107	2107
紋別	MBE	RJEB	143.404007	44.303902	24.384000	24761	51327	75512	509315
新千歳	CTS	RJCC	141.692001	42.775200	24.993600	164645	445365	2464192	3372393
庄内	SYO	RJSY	139.787003	38.812199	26.212800	220521	288854	389678	1696926
新潟	JP7	RJAN	139.268997	34.369400	28.041600	2883	5113	55548	1101273
石垣	ISG	ROIG	124.186996	24.344500	28.346400	46409	48088	50280	52012
富山	TOY	RJNT	137.188004	36.648300	28.956000	515308	951406	1533150	3737864
沖永良部	OKE	RJKB	128.701004	27.425501	30.784800	9121	13920	37470	61422
利島	JP8	0008	139.278787	34.523112	31.000000	668	10871	107831	5360837
茨城	IBR	RJAH	140.414993	36.181099	32.004000	207533	1190714	3077306	29200570
利尻	RIS	RJER	141.186005	45.242001	34.137600	5862	8705	50570	74910
三沢	MSJ	RJSM	141.367996	40.703201	36.271200	102125	454389	596321	1674560
屋久島	KUM	RJFC	130.658997	30.385599	37.795200	8137	21396	39036	191921
大島	OIM	RJTO	139.360001	34.782001	39.624000	8461	52584	345715	15891215
女満別	MMB	RJCM	144.164001	43.880600	41.148000	40101	194377	240126	510579
成田	NRT	RJAA	140.386002	35.764702	42.976800	362387	2072684	8054166	37289944
調布	NP5	RJTF	139.528000	35.671700	42.976800	7359488	21612828	31306196	41882686
宮古	MMY	ROMY	125.294998	24.782801	45.720000	51194	52039	52039	53270
函館	HKD	RJCH	140.822006	41.770000	46.024800	302270	363893	406218	818326
奥尻	OIR	RJEO	139.432999	42.071701	49.072800	2580	3033	7600	109220
南大東島	MMD	ROMD	131.263000	25.846500	50.901600	2107	2107	2107	2107
石見	IWJ	RJOW	131.789993	34.676399	56.083200	51632	81619	213853	3400628
対馬	TSJ	RJDT	129.330994	34.284901	64.922400	21675	28586	34407	80756
中標津	SHB	RJCN	144.960007	43.577499	71.323200	25478	44697	83324	542315
福江	FUJ	RJFE	128.832993	32.666302	83.210400	33122	44020	61897	682400
大館	ONJ	RJSR	140.371002	40.191898	89.001600	54918	175346	536830	2507877
花巻	HNA	RJSI	141.134995	39.428600	90.525600	150567	426647	858812	2501326
南紀白浜	SHM	RJBD	135.363998	33.662201	90.830400	112760	146242	287387	3947631
八丈島	HAC	RJTH	139.785995	33.115002	92.354400	8231	8231	8231	8780
隠岐	OKI	RJNO	133.324997	36.181099	94.792800	14313	18953	21688	663317
秋田	AXT	RJSK	140.218994	39.615601	95.402400	200077	448810	745581	2128792
釧路	KUH	RJCK	144.192993	43.041000	99.669600	70029	211717	229854	786328
天草	JP1	RJDA	130.158997	32.482498	103.632000	71253	171572	1195494	4918959
山形	GAJ	RJSC	140.371002	38.411900	107.594400	238921	547613	1733452	4448756
旭川	JP4	RJCA	142.363007	43.795200	114.909600	374182	424729	585941	994195
御蔵島	JP3	0003	139.594923	33.897750	115.000000	348	3024	3024	24351
静岡	FSZ	RJNS	138.187752	34.796043	131.978400	497690	1178783	2368497	5833024
神津島	JP6	RJAZ	139.134003	34.189999	137.769600	1889	4772	7789	305584
帯広	OBO	RJCB	143.216995	42.733299	153.924000	15195	276362	320182	579221
但馬	TJH	RJBT	134.787003	35.512798	178.003200	95495	228812	561656	6043721
高松	TAK	RJOT	134.016006	34.214199	185.013600	434032	971000	2328823	6941816
熊本	KMJ	RJFT	130.854996	32.837299	195.681600	643877	1217513	1849814	8440048
青森	AOJ	RJSA	140.690994	40.734699	202.387200	325309	690944	891453	1758782
能登	NTQ	RJNW	136.962006	37.293098	218.846400	36351	121988	224478	2071896
種子島	TNE	RJFG	130.990997	30.605101	234.086400	21190	31746	40086	333336
岡山	OKJ	RJOB	133.854996	34.756901	245.668800	476153	1395009	2218956	6729877
青々島	JP2	0002	139.760000	32.468000	272.040000	201	201	201	8432
鹿児島	KOJ	RJFK	130.718994	31.803400	276.148800	184017	570867	1578453	2995867
広島	HII	RJOA	132.919006	34.436100	331.622400	133161	555552	2683653	6490888
福島	FKS	RJSP	140.431000	37.227402	372.160800	167326	682792	1246770	4627445
松本	MMJ	RJAF	137.923004	36.166801	665.073600	368271	663522	1328837	4441246

表 2: 2012 年航空輸送統計の旅客輸送人員および貨物輸送量から取り出した国内線航空輸送ネットワークのうち次数の高い上位 10 空港.

順位	旅客輸送人員			貨物輸送量		
	空港名	ICAO	次数	空港名	ICAO	次数
1	東京	RJTT	100	東京	RJTT	98
2	那覇	ROAH	60	那覇	ROAH	54
3	大阪	RJOO	56	大阪	RJOO	53
4	新千歳	RJCC	56	新千歳	RJCC	52
5	福岡	RJFF	52	福岡	RJFF	46
6	中部	RJGG	36	中部	RJGG	34
7	鹿児島	RJFK	36	鹿児島	RJFK	26
8	関西	RJBB	26	関西	RJBB	23
9	成田	RJAA	26	奄美	RJKA	18
10	長崎	RJFU	20	成田	RJAA	16

の周辺人口を計算した. 表 1 は空港周辺 15km, 30km, 50km, 100km の周辺人口を表す.

2012 年航空輸送統計の年間旅客輸送人員と年間貨物輸送量に対して, 2010 年国勢調査 3 次メッシュデータから求められた空港周辺人口を用いて, (2) 式に対するパラメータ推定を行った. 図 5(a) は, 周辺人口と旅客輸送量に関する二乗誤差を示す. 図 5(b) は周辺人口と貨物輸送量に対する二乗誤差である. 1km メッシュによる周辺人口推定を行っているため,  $d \leq 5$ km 以下での周辺人口の見積りには誤差が多いと判断し,  $5 \leq d \leq 100$  の範囲で半径  $d$  と二乗誤差  $MSE$  との関係を求めた. 重回帰分析の結果, 旅客輸送量では  $d^* = 24$ km (自由度調整済み決定係数:0.377939), 貨物輸送量では  $d^* = 23$ km (自由度調整済み決定係数:0.152620) を得た. 旅客輸送人員と貨物輸送量の空港周辺人口に対するパラメータ推定値を表 3 に示す. 旅客輸送人員と人口の関係では, 人口は有為な説明変数である一方で空港間の距離は  $t$  値が小さく 5%有意水準 ( $\Pr[> |t|] = 0.714226$ ) で有意な説明変数とは言いきれない. また貨物輸送量と人口の関係においては, 空港周辺人口は統計的に有意な説明能力を持つ一方, 空港間距離は 5%有意水準 ( $\Pr[> |t|] = 0.073063$ ) で統計的に有意な説明変数とは言いきれない.

表 3: 重力モデルを用いた日本国内旅客輸送人員と貨物輸送量のパラメータ推定結果

被説明変数, 説明変数	$d^*$ [km]	$\sqrt{E(d^*, \hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3)}$	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$
旅客輸送人員, 人口	24	1.320923	1.929866	0.338085	0.344428	-0.032153
		標準偏差	0.551102	0.031763	0.031763	0.087751
		$t$ -val	3.501827	10.644151	10.843827	-0.366414
貨物輸送量, 人口	23	3.168772	-1.060237	0.327020	0.403752	0.395773
		標準偏差	1.421215	0.081220	0.081360	0.220203
		$t$ -val	-0.746008	4.026336	4.962538	1.797314

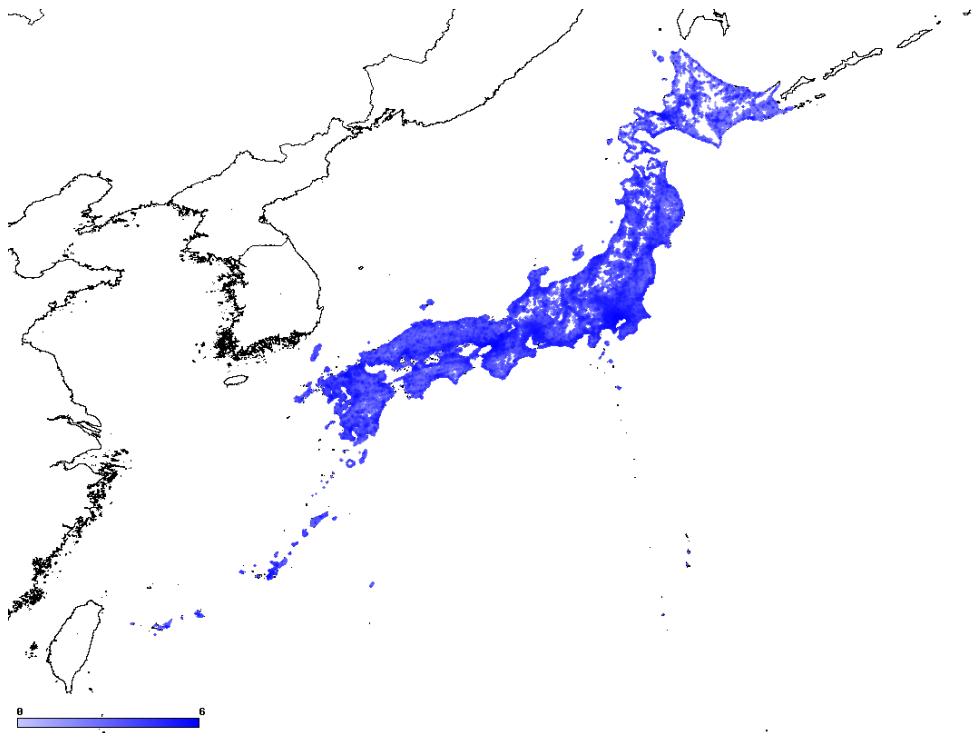


図 4: 総務省統計局 2010 年国勢調査の 3 次メッシュデータから描いた人口の空間分布.

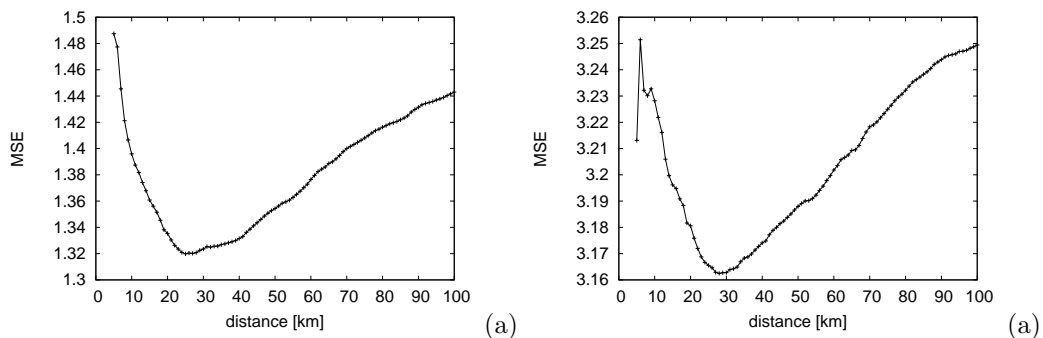


図 5: (a) 旅客輸送量と周辺人口に対する重力モデルの二乗誤差. (b) 貨物輸送量と周辺人口に対する重力モデルの二乗誤差.

### 3 まとめと今後の課題

日本国内における航空輸送について重力モデルを仮定してパラメータの推定を行った. 出発地点の人口より到着地点の人口のほうが若干説明能力が高いことがわかった. 旅客輸送量および貨物輸送量ともに出発空港と到着空港との間の距離に対して 5%有意水準で統計的に有意な依存性を認めることができなかった. 説明能力がもっとも高い空港近傍距離として旅客輸送人員では 24km, 貨物輸送量では 23km を得た.

今後の課題として世界の人口メッシュデータと航空輸送統計を用いることによる世界航空輸送ネットワークでの重力モデルの推計および, それを利用したリスク推計 [5] と航空輸送ネットワーク構造の最適化 [6] への発展が挙げられる.

## 謝辞

本研究を実施する上で京都大学田島敬史教授, スイス連邦工科大学 Dirk Helbing 教授, Olivia Woolley 博士との議論が大変有益であった。ここに感謝の意を表す。本研究は, 日本学術振興会科研費基盤研究 (C)(#25390152) の財政的支援を受けて行われています。また, 本研究は HPCI システム利用研究課題 (統計数理研究所提供) の成果によるものです (課題番号:hp140076)。

## 参考文献

- [1] Zipf, G.K., “The P1 P2 / D hypothesis: on the intercity movement of persons”, Am. Sociol. Rev., **11**, 677–686 (1946).
- [2] F. Simini, M.C. González, A. Maritan and A.-L. Barabási, “A Universal model for mobility and migration patterns”, Nature, 484 (2012) 96–100.
- [3] 総務省統計局国勢調査 3 次メッシュデータ e-Stat 地図で見る統計 (統計 GIS) <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/toukeiChiri.do?method=init>
- [4] 国土交通省総合政策局情報政策課交通経済統計調査室 航空輸送統計 <http://www.mlit.go.jp/k-toukei/koukuu/koukuu.html>
- [5] Aki-Hiro Sato, Hidefumi Sawai, “Geographical risk assessment from tsunami run-up events based on socioeconomic-environmental data and its application to Japanese air transportation”, Procedia CIRP, Volume 19 (2014) pp. 27-32
- [6] Hidefumi Sawai, Aki-Hiro Sato, “Multi-Objective Optimization for Resilient Airline Networks Using Socioeconomic-Environmental Data”, IEEE BigData Conference, Washington DC, USA