一般財団法人日本エネルギー経済研究所
第３回 エネルギー・環境論文コンテスト入選論文

自治体単位の資源量推定と物流拠点配置に基づく国産 SAF 原料供給ネットワークの設計

杉山 輝恵
東京科学大学工学院システム制御系学士課程 3 年

１．はじめに

航空分野は、道路交通や鉄道と比較して電動化が難しい分野の一つである。特に中長距離航空では、航続距離や機体重量の制約から、今後も高いエネルギー密度を持つ液体燃料への依存が続くと考えられる。そのため、既存の航空機や燃料供給インフラを利用しながらライフサイクル温室効果ガス排出量を削減できる持続可能な航空燃料、Sustainable Aviation Fuel（SAF）が航空分野の脱炭素化における重要な選択肢となっている[1]。

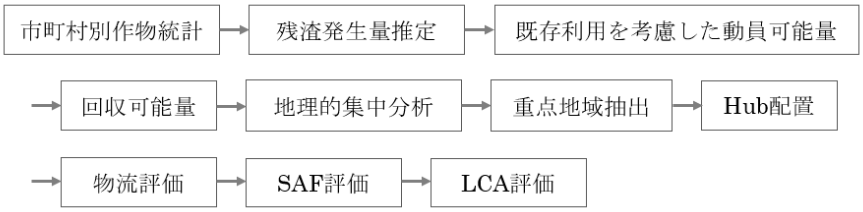
日本では 2030 年に航空燃料消費量の 10%を SAF へ置き換える目標が示されており、2030 年時点の国内 SAF 需要量は約 172 万 kL/年と見込まれている[1]。NEDO が整理した需給見通しでも、2030 年の需要 172 万 kL/年に対して国内供給 192 万 kL/年が想定されており、HEFA や Alcohol-to-Jet（ATJ）をはじめとする複数の製造経路の社会実装が期待されている。

SAF に関する研究開発では、廃食用油等を用いる HEFA、アルコールを原料とする ATJ、バイオマスガス化と Fischer-Tropsch 合成を組み合わせる経路など、製造技術そのものが大きく注目されてきた。しかし、SAF 製造設備が存在しても、その上流において原料を安定的かつ低コストで調達できなければ大規模な生産は成立しない。特に農業残渣は原油のように一か所に集積して存在する資源ではなく、多数の農地や自治体に分散して発生するため、回収、保管、前処理、輸送を含めた供給網設計が重要となる[6]。

また、農業残渣の全量を SAF 原料として利用できるわけではない。稲わらには圃場へのすき込み、粗飼料、堆肥、畜舎敷料、マルチ等の既存用途が存在し、もみ殻についても堆肥、敷料、暗渠資材、くん炭等として利用されている。農林水産省によれば、2024 年産の稲わら発生量 628.6 万 t のうち 62.5%がすき込み、7.0%が粗飼料として利用されている。また、もみ殻 124.7 万 t についても、27.4%が堆肥、16.1%が畜舎敷料として利用されている[2]。

したがって、単純な残渣発生総量をそのまま SAF 供給可能量とみなすと、現実の利用可能量を大きく過大評価する可能性がある。重要なのは、「全国に何 t の残渣が存在するか」だけではなく、「既存用途と競合せず、実際に回収可能な量がどの地域にどの程度集中しているか」、さらに「それをどこへ集約すれば物流負荷を抑えられるか」を同時に評価することである。

そこで本研究では、自治体を共通の分析単位として、①水稲生産量、②残渣発生量、③既存利用を考慮した動員可能量、④回収可能量、⑤地理的集中、⑥集約拠点配置、⑦輸送負荷、⑧SAF 転換量、⑨ライフサイクル GHG 排出量を統合的に評価した。この自治体単位の分析基盤を本研究では「SAF Feedstock Atlas」と呼び、国産 SAF 原料供給網の初期設計手法として提示する。本研究の分析フローを図 1 に示す。



【図 1】本研究の分析フロー

2．データおよび分析方法

2-1．使用データ

使用データを表 1 に示す。水稲収穫量には、農林水産省「作物統計調査 令和 6 年産市町村別データ」を用いた。同統計では 2024 年について市町村別の水稲収穫量が公開されている[3]。 本研究で取得した市町村別データの合計は 7,343,461t であり、全国公表値との差は約 0.02%であったため、市町村別資源量推定の基礎データとして使用可能と判断した。

地理情報には国土交通省「国土数値情報 行政区域データ N03 2024 年版」を用いた。同データは 2024 年 1 月 1 日時点の行政区域および全国地方公共団体コードを GIS データとして収録している[4]。 人口および世帯数には、総務省「住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数調査」の 2024 年データを用いた[5]。作物統計、人口・世帯データ、行政区域データを 5 桁の全国地方公共団体コードで統合し、水稲生産量が確認できる 1,581 自治体について解析を行った。

データ	年	主な用途
農林水産省 作物統計調査 市町村別データ[3]	2024	水稲収穫量
農林水産省 稲わら・もみがら発生状況[2]	2024	全国発生量、既存利用割合
国土交通省 国土数値情報 N03[4]	2024	行政区域・地理分析
住民基本台帳関連統計[5]	2024	人口・世帯数
NEDO 資料[1]	2030 目標	SAF 需要量・ATJ 技術目標
ICAO/CORSIA[12][13]	デフォルト値	LCA benchmark
国土交通省 物流 CO_2排出原単位資料[11]	ガイドライン	輸送排出原単位

【表 1】使用データ一覧

2-2．残渣発生量の推定

市町村別統計には稲わら・もみ殻そのものの発生量が記載されていないため、水稲収穫量に Residue-to-Product Ratio（RPR）を乗じて推定した。ただし、一般的な文献値をそのまま適用した場合、品種、含水率、統計上の定義等によって農林水産省の全国発生量と乖離する可能性がある。

そこで本研究では、農林水産省が示す 2024 年産の稲わら発生量 6,286 千 t、もみ殻発生量 1,247 千 t と整合するよう RPR を校正した[2]。その結果、稲わらの Base RPR を 0.8560、もみ殻を

0.1698 とした。これは独立した文献値ではなく、農林水産省の全国公表総量[2]と市町村別水稲収穫量[3]を整合させるために本研究で設定した校正係数である。
自治体 iにおける残渣発生量 R_iは、

$$R_i = P_i \times RPR$$

とした。ここで P_iは自治体 iの水稲収穫量である。

2-3．回収可能量

農業残渣には既存用途が存在するため、発生量全量を SAF 原料とせず、既存利用との競合が比較的小さい部分のみを対象とした。稲わらについては、すき込み、粗飼料、堆肥、敷料、マルチ等を原則として SAF へ転用せず、焼却、その他、用途不明分の一部を対象とした。もみ殻についても、堆肥、敷料、暗渠資材、マルチ、くん炭、床土代替、既存燃料用途等を原則維持し、廃棄および用途不明分の一部を対象とした。
回収可能量 C_iは、

$$C_i = R_i \times A \times E$$

とした。ここで Aは動員可能率、E は回収効率である。全国統一の実測回収効率は得られなかったため、本研究では不確実性を確認する目的で Low、Base、High の 3 シナリオを設定した。

項目	Low	Base	High
残渣発生係数	Base×0.9	Base	Base×1.1
稲わら動員可能率	1.2%	5.825%	16.7%
稲わら回収効率	68%	80%	90%
もみ殻動員可能率	8.7%	14.825%	20.95%
もみ殻回収効率	80%	90%	95%

【表 2】回収可能量推計に用いたシナリオ設定

※残渣発生係数の Base 値は、農林水産省の 2024 年市町村別水稲収穫量[3]と、全国の稲わら・もみ殻発生量[2]が整合するよう本研究で校正した。Low、High は Base 値に対してそれぞれ－10%、＋10%として設定した。

※稲わら及びもみ殻の動員可能率は、農林水産省が示す用途別利用状況[2]を基礎として、本研究で Low、Base、High の 3 シナリオを設定した。

※回収効率は、残渣回収条件の不確実性を考慮するための本研究のシナリオ設定値である。農業残渣の収集・輸送条件については既往研究[6][7][16]を参照した。

表 2 に示す動員可能率および回収効率は、農林水産省による既存利用割合[2]を参考に本研究で設定した感度分析用のシナリオ仮定であり、全国統一の実測値ではない。したがって、本研究の推計結果は実際の回収量ではなく、シナリオに基づく回収可能ポテンシャルを表す。

2-4．地理的集中分析

各自治体について Base シナリオの稲わら・もみ殻回収可能量を合計し、値の大きい順に並べた。さらに累積回収可能量割合を算出し、全国資源量の 25%、50%、75%、90%を占めるため

に必要な自治体数を求めた。

2-5．集約拠点配置

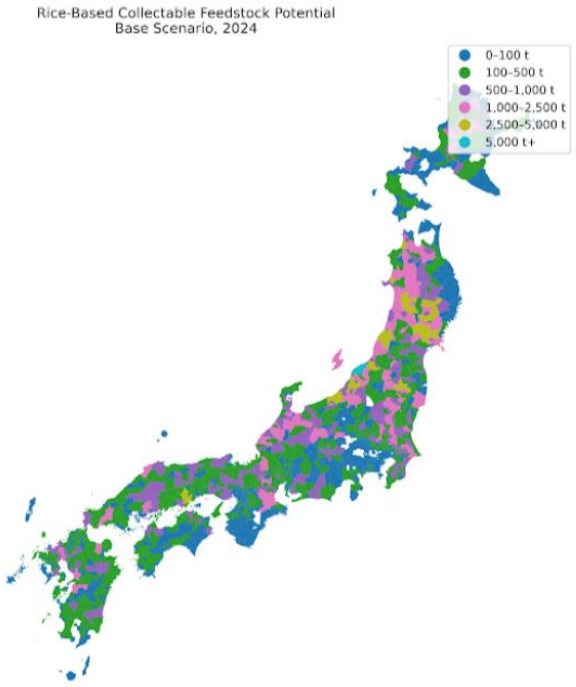
資源密度の高い地域における原料供給網を評価するため、回収可能量を重みとした Weighted K-means clustering を用いて 1〜5 拠点の場合を比較した。農業残渣の供給網では、原料の空間分布や輸送距離が物流効率を大きく左右する[6]。そこで、各自治体の回収可能量を重量とし、クラスタ中心までの距離を用いて重量平均距離および総 ton-km を算出した。

ただし、K-means は二乗ユークリッド距離を最小化する手法であり、道路距離や輸送コストそのものを直接最小化するものではない。本研究では拠点配置の探索的候補抽出として用い、社会実装を想定した評価では既存港湾を候補に置換した。

3．全国の回収可能量と地理的集中

Base シナリオにおける全国の稲わら回収可能量は 292,928t/年、もみ殻は 166,370t/年となり、合計 459,298t/年と推定された。Low シナリオでは約 12.4 万 t/年、High シナリオでは約 131.2 万 t/年となり、回収効率や未利用部分の扱いによって推計値が大きく変化することも確認された。

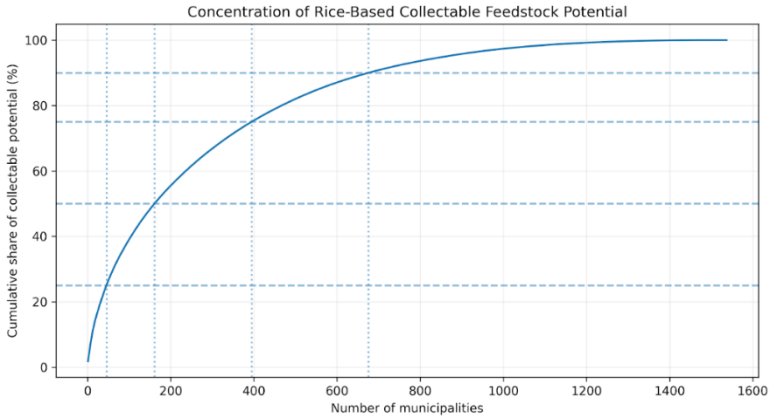
Base シナリオの自治体別分布を図 2 に示す。回収可能量は全国一様ではなく、水稲生産量の大きい北海道、東北、北陸等の地域に高密度な自治体が分布している。



【図 2】Base シナリオにおける自治体別稲わら・もみ殻回収可能ポテンシャル

自治体を回収可能量の大きい順に並べた結果、全国量の 25%は上位 46 自治体、50%は上位 161 自治体、75%は上位 395 自治体、90%は上位 676 自治体によって占められた。特に、分析

対象 1,581 自治体の約 10.2%にすぎない上位 161 自治体が、全国回収可能ポテンシャルの半分を占める結果となった。



【図 3】稲わら・もみ殻回収可能ポテンシャルの自治体別累積集中度

この結果は、SAF 原料供給網を全国一律に整備する必要性が低いことを示唆する。資源密度の低い地域まで同時に回収網を拡大した場合、単位原料当たりの輸送距離や収集コストが増加する可能性が高い[6]。したがって、導入初期には高密度地域を重点化し、供給網を段階的に拡張する方式が合理的と考えられる。

また、上位 161 自治体の地域分布を確認したところ、東北 6 県および北陸 4 県に 85 自治体が含まれていた。この 85 自治体の Base 回収可能量は 144,323t/年であり、全国 Base シナリオの 31.4%を占めた。そこで以下では、同地域を国産農業残渣 SAF 供給網の初期導入候補としてケーススタディの対象とした。

4．東北・北陸地域における物流拠点設計

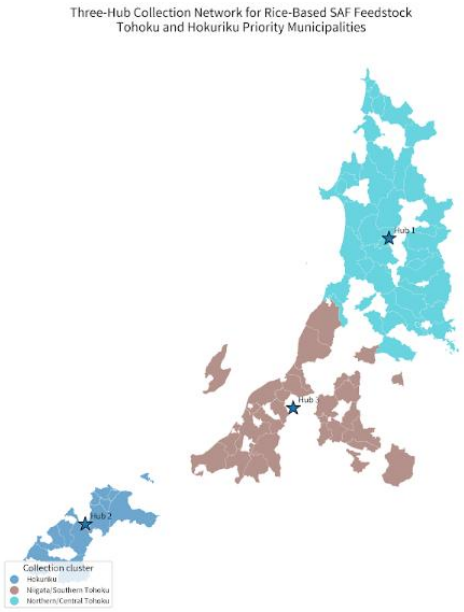
85 重点自治体を対象に、回収可能量を重みとする Weighted K-means を用いて 1〜5 拠点の配置を比較した（表 3）。1 拠点の場合の重量平均距離は 156.6km、総 ton-km は約 2,261 万 t-km/年であった。2 拠点では 94.9km、約 1,369 万 t-km/年、3 拠点では 69.6km、約 1,005 万 t-km/年となった。4 拠点では 55.9km、約 806 万 t-km/年、5 拠点では 48.5km、約 700 万 t-km/年となった。

1 拠点方式を基準とした総 ton-km 削減率は、2 拠点で 39.4%、3 拠点で 55.6%、4 拠点で 64.3%、5 拠点で 69.0%であった。拠点数を増加させれば輸送距離は短縮するが、3 拠点以降では追加的な削減幅が次第に小さくなっている。

Hub 数	重量平均距離 km	総 ton-km/年	K=1 比削減率
1	156.6	22.61×10^{6}	0%
2	94.9	13.69×10^{6}	39.4%
3	69.6	10.05×10^{6}	55.6%
4	55.9	8.06×10^{6}	64.3%
5	48.5	7.00×10^{6}	69.0%

【表 3】拠点数別の重量平均距離、総輸送量距離および K=1 比削減率

実際には各 Hub に土地、保管設備、乾燥・圧縮設備、人員等が必要となり、稲わら供給網では回収、輸送、保管、前処理等が物流コストを左右することが報告されている[6][7]。このため、拠点数を無制限に増加させることは合理的ではない。本研究では設備投資額を直接評価していないが、物流効率の限界改善を考慮し、3 拠点を初期候補とした（図 4）。



【図 4】東北・北陸 85 重点自治体における 3 拠点集約クラスタ

3 クラスタのうち、北東北・中央東北クラスタは 41 自治体、約 72,296t/年で対象地域の 50.1%、北陸クラスタは 14 自治体、約 16,130t/年で 11.2%、新潟・南東北クラスタは 30 自治体、約 55,897t/年で 38.7%を占めた。

理論的なクラスタ中心に新たな Hub を建設することは、物流距離のみを考えれば有利である。しかし、実際には新規用地取得、アクセス道路、荷役・保管設備等への投資が必要となる。そこで既存インフラを利用するケースとして各クラスタ周辺の主要港湾を候補とし、総 ton-km を比較した。

その結果、北東北・中央東北では秋田港、北陸では金沢港、新潟・南東北では新潟港が、比較した候補港の中で最小 ton-km となった。港湾制約を課した 3Hub 方式の総 ton-km は約 1,188 万 t-km/年、重量平均距離は 82.3km となり、理論的な 3 クラスタ中心と比較して約 18.3%増加した。

この 18.3%は物流効率の悪化を意味する一方で、新規 Hub 建設を避け既存物流インフラを活用できる可能性を示す。SAF 原料供給網の社会実装では、単純な距離最小化だけでなく、新規設備投資、既存インフラ、港湾機能、保管可能量等を含む複数の目的を同時に考慮する必要がある。

5．SAF 転換ポテンシャル

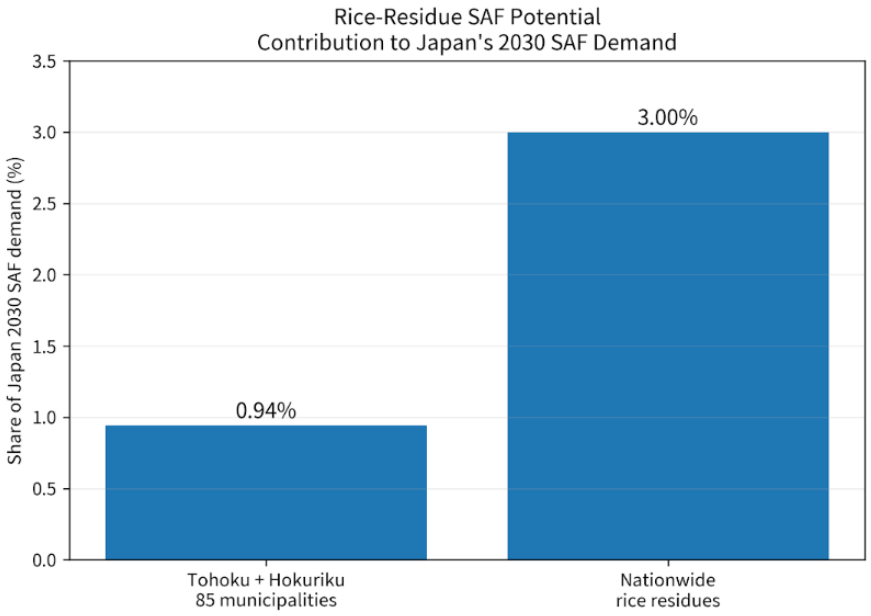
東北・北陸 85 自治体における Base シナリオの回収可能量は、稲わら 92,045t/年、もみ殻 52,278t/年、合計 144,323t/年であった。

本研究では、これらのリグノセルロース系残渣をエタノールへ転換し、その後 ATJ により SAF へ転換する経路を概算評価ケースとして設定した。Base シナリオでは稲わら 250L-ethanol/t、もみ殻 180L-ethanol/t を仮定した。稲わらについては、既往研究において約 0.28 L/kg-biomass、すなわち約 280 L/t-biomass の潜在的エタノール収率が整理されている[8]。そこで本研究では、実際の原料状態やプロセス損失を考慮した概算評価の仮定として、Base シナリオのエタノール収率を 250 L/t とした。もみ殻については、プロセスシミュレーションにより 250.56 L/t-dry biomass のエタノール収率が報告されている[9]。 本研究ではこれより保守的な 180 L/t を Base シナリオとして設定した。

ただし、これらの文献値は乾物基準であり、本研究で使用した農林水産省の残渣統計と含水率基準が完全には一致しない。このため、本研究の SAF 換算値は実プラントの実生産量ではなく、原料ポテンシャルを比較するための概算値として扱う。

ATJ 転換については、NEDO のグリーンイノベーション基金において、2030 年までにエタノールから SAF を製造する ATJ 技術で液体燃料収率 50%以上を実現することが目標として示されている[10]。 本研究ではこれを参考に、Base シナリオで 50%の転換係数を設定した

その結果、東北・北陸 85 自治体では約 32.4 千 kL/年のエタノールに相当し、SAF 換算量は約 16.2 千 kL/年となった。これは 2030 年国内 SAF 需要 172 万 kL/年の約 0.94%に相当する。全国の Base 回収可能量へ同じ係数を適用した場合、稲わら・もみ殻だけで約 51.6 千 kL-SAF/年、2030 年需要の約 3.0%に相当した（図 5）。



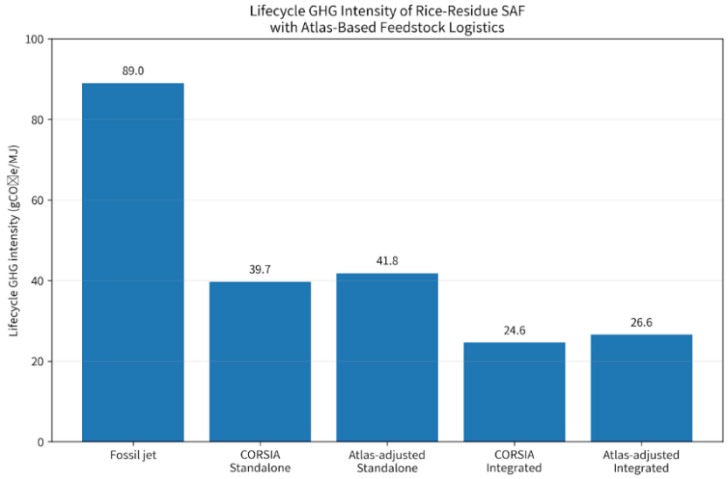
【図 5】稲わら・もみ殻由来 SAF ポテンシャルと 2030 年国内 SAF 需要の比較

約 3%という値は国内 SAF 需要全量を賄う規模ではない。しかし、本研究では稲わら・もみ殻の 2 原料のみを対象としている。林地残材、剪定枝、食品残渣、廃食用油等を原料別に追加することで、複数原料を組み合わせた地域供給網へ拡張できる可能性がある。

6．物流由来排出量とライフサイクル GHG 評価

港湾制約を考慮した 3Hub 方式について、Base シナリオの推計道路輸送距離は重量平均約 102.9 km、年間総輸送量は約 1,485 万 t-km となった。輸送由来 CO_2排出量には、国土交通省が示す 2024 年度の営業用貨物車の CO_2排出原単位 195 g-CO_2/t-km を用いた[11]。その結果、年間約 2,896 t-CO_2と推計された。

SAF のライフサイクル GHG 評価には ICAO/CORSIA のデフォルト値を用いた。化石ジェット燃料の基準値は 89.0 gCO_2e/MJ であり、農業残渣由来 ethanol-to-jet（エタノールから SAF への ATJ 転換）については独立型経路（standalone pathway）で 39.7 gCO_2e/MJ、統合型経路（integrated pathway）で 24.6 gCO_2e/MJ が示されている[12][13]。



【図 6】Atlas に基づく原料物流を考慮した稲わら・もみ殻由来 SAF のライフサイクル GHG 排出強度

本研究では、これらのデフォルト値に含まれる原料輸送部分を、本研究で算出した Atlas に基づく原料物流の輸送排出量に置き換えた。ICAO の LCA 評価手法では、農業残渣由来 ethanol-to-jet の原料輸送部分として独立型経路に 3.1 gCO_2e/MJ、統合型経路に 3.2 gCO_2e/MJ が含まれている[13]。そこで本研究では、この原料輸送部分を差し引き、本研究の Atlas に基づく原料物流から算出した 5.19 gCO_2e/MJ に置き換えた。その結果、独立型経路は 41.8 gCO_2e/MJ、統合型経路は 26.6 gCO_2e/MJ となった（図 6）。

国内物流を反映することで CORSIA デフォルト値より GHG 排出強度はわずかに増加したものの、化石ジェット燃料と比較すると独立型経路で約 53.0%、統合型経路で約 70.1%の削減となった。したがって、東北・北陸からの原料輸送を考慮しても、統合型 ATJ 経路では大幅なライフサイクル GHG 削減余地が存在すると考えられる。

ただし、本結果は ICAO/CORSIA のデフォルト経路と本研究の物流シナリオを組み合わせたベンチマーク基準評価であり、日本産稲わら・もみ殻由来 SAF の実測値や認証値ではない。

7．考察

7-1．原料総量ではなく資源密度に着目する必要性

本研究の主要な知見は、稲わら・もみ殻の回収可能ポテンシャルが全国に均等に分布しているのではなく、限られた自治体へ強く集中している点である。分析対象自治体の約 10.2%に相当する上位 161 自治体だけで全国基準回収可能量の 50%を占めた。

SAF 原料政策を考える際、全国総量の大きさだけを示すと、原料が日本中どこからでも同程度に調達できるような印象を与える。しかし実際には、低密度地域から少量の残渣を長距離輸送すれば、物流費、GHG 排出、運用負担が増加する[6]。したがって、SAF 原料供給網の初期段階では、高密度地域に回収・保管・前処理設備を集中させる方が合理的である。

7-2．農業残渣は廃棄物とは限らない

農業残渣を SAF 原料として評価する際には、「未利用資源」という言葉を慎重に扱う必要がある。稲わらの圃場すき込みは単なる処分ではなく、土壌有機炭素の維持や窒素、リン、カリウム等の養分循環に寄与する場合がある[14][15]。粗飼料や敷料等にも既存の経済価値が存在する。

したがって、残渣全量を SAF へ転用することは、既存資源利用との競合や土壌への養分還元低下等の影響を引き起こす可能性がある[14][15]。本研究ではこの問題を回避するため、既存用途を原則維持し、比較的利用されていない部分だけを SAF 向け動員可能量として扱った。

この考え方は、単なる最大ポテンシャル推計よりも得られる量を小さくするが、社会実装可能性を考えればむしろ重要である。SAF 導入量を最大化するのではなく、農業システム全体の持続可能性と両立する範囲を探索する必要がある。

7-3．理論最適拠点と既存インフラ利用

物流分析では理論上の 3Hub に対し、既存港湾である秋田、新潟、金沢を利用すると総 ton-km が約 18.3%増加した。純粋な距離最小化だけで見れば理論 Hub が有利である。

一方、実際に新規 Hub を建設する場合には、土地取得、保管設備、乾燥・圧縮設備、アクセス道路、荷役設備等への追加投資が必要となる。バイオマス供給網では、輸送距離だけでなく中間保管や前処理設備の配置も供給コストを左右する[6][7]。既存港湾では物流インフラを活用できる可能性があり、18.3%の輸送増加を許容しても、総事業費では有利となる可能性がある。

したがって、今後の拠点配置モデルでは ton-km 最小化だけではなく、設備投資、運用費、Hub 処理能力、既存インフラ、GHG 排出を含む多目的最適化へ拡張する必要がある。

7-4．社会実装主体

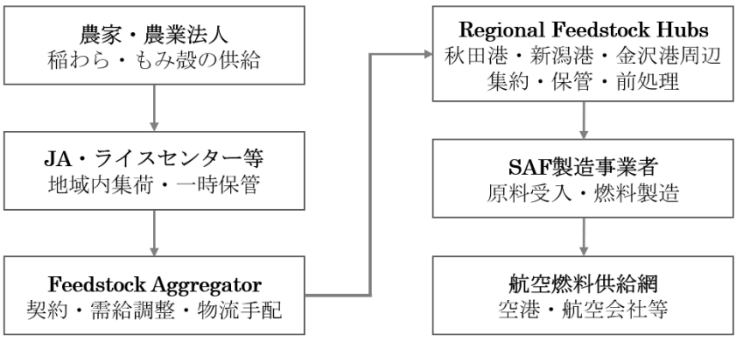
農業残渣は多数の供給地点に分散して発生するため、大規模利用には集約・仲介機能が重要となる[6]。そこで本研究では、農家等の供給主体と大規模な SAF 製造事業者を仲介する主体として原料集約事業者「Feedstock Aggregator」を想定する。

Feedstock Aggregator は、SAF Feedstock Atlas を用いて年間調達計画を作成し、農家・農業法人や JA、カントリーエレベーター、ライスセンター等と原料供給量を調整する。さらに

物流会社への集荷発注、広域 Hub での在庫・品質管理、SAF 製造事業者への大口供給を担う。

地域内では農家から最寄りの農業集積施設へ原料を集め、そこから秋田、新潟、金沢等の広域 Hub へ輸送する。Hub では計量、保管、乾燥、圧縮、必要に応じた粉砕やペレット化を行うことで、低密度でかさばる農業残渣の長距離輸送効率を改善する。

自治体は地域調整や初期設備支援、JA は農家との窓口、物流会社は輸送、SAF 製造事業者は原料購入と燃料製造、航空会社は長期的な SAF 需要を形成する主体として参加することが考えられる。SAF Feedstock Atlas は、そのネットワークに対し「どの自治体から、どの程度の量を、どの Hub へ送るべきか」という意思決定情報を提供する（図 7）。



【図 7】SAF Feedstock Atlas を活用した地域集約型原料供給ネットワーク

8．本研究の限界と今後の課題

本研究には複数の限界がある。

第一に、動員可能率および回収効率は全国統一の実測値ではなく、既存利用統計を基礎としたシナリオ仮定である。したがって、実際の農家がどの程度の残渣を供給可能と考えるか、地域ごとの既存取引や保管条件を含めて検証する必要がある。

第二に、残渣発生量は全国発生総量と整合するよう校正した RPR を市町村別水稲収穫量へ一律適用している。実際には品種、収穫方法、含水率等によって残渣量は変動する。

第三に、Weighted K-means は直線距離に基づく探索的クラスタリングであり、実際の道路ネットワークや道路勾配、通行条件、季節的な集荷集中を反映していない。今後は道路距離を用いた p-median 問題や容量制約付き施設配置問題として再定式化し、Hub 処理能力制約を含める必要がある。

第四に、圃場から地域集積拠点までの一次輸送を詳細には評価していない。特に稲わらは体積密度が低く、圃場からの回収、ベーリング、輸送、保管が供給コストを大きく左右することが報告されている[7][16]。

第五に、本研究では Hub 建設費、乾燥・圧縮費、原料購入価格、SAF 製造費等を含む詳細な技術経済性評価を行っていない。今後は物流最適化結果と設備費・運転費を統合し、SAF 1L 当たりの原料供給コストを算出する必要がある。

さらに、稲わら除去による土壌有機炭素、窒素、リン、カリウム等の養分循環への影響についても評価が必要である[14][15]。将来的には農学的制約を回収可能率へ組み込み、「技術的に回収可

能な量」ではなく「農業生態系を維持しながら持続的に回収可能な量」を推定することが望まれる。

また、SAF Feedstock Atlas は稲わら・もみ殻に限定されるものではない。林地残材、剪定枝、食品残渣、廃食用油等のデータを同じ自治体コード上へ統合することで、地域ごとに異なる原料を組み合わせた複数原料型供給網へ拡張できる。農業生産量、原料価格、道路条件、Hub 容量、SAF 需要を毎年更新すれば、固定的な供給網ではなく、原料発生量の変化に適応して調達地域を更新する適応型原料供給網として発展させることも可能である。

9．結論

本研究では、国内 SAF 普及における上流原料供給の課題に着目し、2024 年の市町村別作物統計等を用いて稲わら・もみ殻の発生量、既存利用、回収可能量、地理的集中および物流条件を自治体単位で統合的に評価した。

Base シナリオでは、稲わら約 29.3 万 t/年、もみ殻約 16.6 万 t/年、合計約 45.9 万 t/年の回収可能ポテンシャルが得られた。また、分析対象 1,581 自治体の約 10.2%に相当する上位 161 自治体で全国回収可能量の 50%を占めることが明らかとなった。

特に東北 6 県および北陸 4 県の 85 重点自治体には、全国の 31.4%に相当する約 14.4 万 t/年が集中した。Weighted K-means による分析では、3 拠点への集約によって 1 拠点方式と比較して総 ton-km を約 55.6%削減できた。さらに既存港湾を利用する場合、秋田、新潟、金沢の 3 拠点が有力候補となり、理論最適拠点と比較した物流増加は約 18.3%であった。

Base シナリオの 85 自治体では約 1.62 万 kL-SAF/年、全国へ拡張した場合には約 5.16 万 kL-SAF/年の技術ポテンシャルが得られ、後者は 2030 年国内 SAF 需要の約 3.0%に相当した。さらに ICAO/CORSIA のデフォルト経路を用いたベンチマーク評価では、国内物流を反映した統合型 ATJ 経路でも化石ジェット燃料比約 70.1%のライフサイクル GHG 削減余地が示された。

以上の結果から、国産 SAF の導入拡大には、製造技術開発だけでなく、地域に分散する原料をどこから、どの程度、どの拠点へ集約するかという上流供給網の設計が重要である。全国資源量の把握と地域物流設計を接続する SAF Feedstock Atlas は、未利用地域資源を実際のエネルギー供給網へ結び付けるための一つの方法となり得る。

１０．　参考文献

[1] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO），「SAF の社会実装に向けた NEDO の取組み」，2026.

[2] 農林水産省，「参－② 稲わら、もみがらの発生状況（令和 6 年産）」，2026.

[3] 農林水産省，「作物統計調査 市町村別データ 令和 6 年産市町村別データ」，政府統計の総合窓口 e-Stat，2024 年調査.

[4] 国土交通省，「国土数値情報 行政区域データ N03 2024 年版」，2024.

[5] 総務省，「住民基本台帳に基づく人口、人口動態及び世帯数調査」，政府統計の総合窓口 e-Stat，2024.

[6] Wang, S., Huang, X., Yin, C. and Richel, A., “A critical review on the key issues and optimization of agricultural residue transportation,” Biomass and Bioenergy, Vol. 146, 105979, 2021. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.105979

[7] Ishii, K., Furuichi, T., Fujiyama, A. and Watanabe, S., “Logistics cost analysis of rice straw pellets for feasible production capacity and spatial scale in heat utilization systems: A case study in Nanporo town, Hokkaido, Japan,” Biomass and Bioenergy, Vol. 94, pp. 155–166, 2016. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.007

[8] Ludfiani, D. D., Arianti, F. D., Pertiwi, M. D., Prasetyo, T., Djarot, I. N., Santoso, A. D., Sasongko, N. A. and Astuti, W., “Ensiling treatment of rice straw with cow paunch content to enhance bioethanol production,” Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Vol. 10, 100778, 2024. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100778

[9] Quintero, J. A., Moncada, J. and Cardona, C. A., “Techno-economic analysis of bioethanol production from lignocellulosic residues in Colombia: A process simulation approach,” Bioresource Technology, Vol. 139, pp. 300–307, 2013. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.048

[10] 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO），「CO2 等を用いた燃料製造技術開発 持続可能な航空燃料（SAF）製造に係る技術開発」， グリーンイノベーション基金事業.

[11] 国土交通省，「モーダルシフトとは」，物流・自動車局物流政策課，2024 年度試算.

[12] International Civil Aviation Organization (ICAO), “CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels,” CORSIA Eligible Fuels documentation.

[13] International Civil Aviation Organization (ICAO), “CORSIA Supporting Document: CORSIA Eligible Fuels Life Cycle Assessment Methodology,” CORSIA Eligible Fuels documentation.

[14] Ladha, J. K. et al., “Tillage, crop residue, and nutrient management effects on soil organic carbon in rice-based cropping systems: A review,” Journal of Integrative Agriculture, Vol. 16, No. 1, pp. 1–15, 2017. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61337-0

[15] Chivenge, P. et al., “Rice Straw Incorporation Influences Nutrient Cycling and Soil Organic Matter,” in Sustainable Rice Straw Management, Springer, pp. 131–144, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8_8

[16] Nguyen, H. V., Nguyen, C. D., Tran, T. V., Hau, H. D., Nguyen, N. T. and Gummert, M., “Energy efficiency, greenhouse gas emissions, and cost of rice straw collection in the Mekong River Delta of Vietnam,” Field Crops Research, Vol. 198, pp. 16–22, 2016. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.08.024

※本研究では、文章の校正、先行研究の探索および翻訳、ならびにデータ分析に用いる Python コードの作成・修正に生成 AI を活用した。