

酒質制御システムに関する研究（Ⅰ）

－蒸留曲線制御と酒質変化に関する研究－

泉川達哉、金城洋、比嘉賢一、玉村隆子、宮里吉廣^{*1}、又吉英進^{*1}

泡盛の酒質は蒸留装置の構造や蒸留操作によって大きく変化することが経験的に知られているが、これまで蒸留に関する研究例は少なく、蒸留が酒質に与える影響については未だ不明な点が多く残されている。

蒸留操作の指標となる蒸留曲線は、縦軸をアルコール濃度、横軸を蒸留時間とする右下がりの曲線で、その挙動は蒸留装置の形状や蒸留時の温度条件などで変化する。本研究では、予め設定した蒸留曲線に沿って自動的に蒸留を行うシステムを開発し、このシステムにおいて種々の曲線による蒸留を行い酒質の変化について調べた。

1 はじめに

アルコール蒸留曲線は、蒸留操作の指標となるものであり、その挙動は蒸留装置の濃縮塔長さや装置内における邪魔板などの物理的条件、およびモロミの加熱度合いや濃縮塔の温度などといった熱的条件によって変化することが知られている。

本研究では、蒸留中のアルコール濃度を随時測定しながらモロミの加熱度合いを調整し、予め設定した蒸留曲線に沿って自動的に蒸留を行うシステムを開発した。また開発したシステムを用いて3種類の曲線を用いた蒸留実験を行い酒質の変化を調べた。

蒸留操作と酒質の関係が明らかになれば、泡盛の更なる酒質向上やアルコール収量（蒸留歩合）の増加が期待できる。また、開発した自動蒸留システムは蒸留工程に携わる作業者の負担を軽減する品質管理ツールとしても用いることが可能である。

2 実験方法

2-1 自動蒸留システムの構成

本研究で使用したのは、図1に示す縦型間接加熱式の蒸留装置である。蒸留缶内のモロミは加熱蒸気によって間接的に加熱され、高温となったモロミからは各種成分が気化する。これらの成分はウマと呼ばれる部分を経て冷却塔で凝縮、液化される。一般的な蒸留装置では浮標などを用いてアルコール濃度を測定しているが、本装置ではアルコールの留出口に設けたセンサによって測定した密度と温度からアルコール濃度を算出している。加熱蒸気の流量は蒸留缶の直前に設けたエア駆動のダイヤフラム式バルブによって制御するものとした。ダイヤフラム式バルブは応答速度に優れているため、目標度数の

変化率が大きい場合でも素早い対応が可能となる。

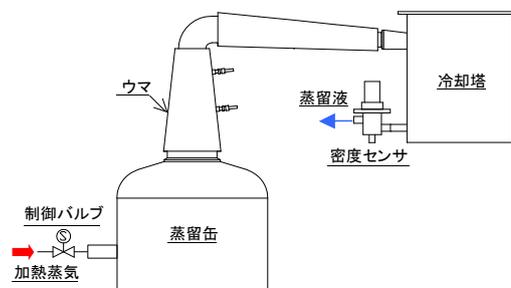


図1. 自動蒸留システムの構成

蒸留液の密度・温度測定部を図2に示す。留出直後のアルコール濃度を遅れなく測定するため、測定部の容積を可能な限り小さくした。測定に使用した振動式密度センサを図3、その仕様を表1に示す。振動式密度センサは、プローブとコントローラから構成されており、そのプローブの先端はコントローラによって常に約1kHzで振動するように制御されている。プローブを液体に浸すと、液体がプローブの溝に入り込んで見かけ上の慣性質量が増加し共振周波数が低い方向へ変化する。コントローラでは、この変化を密度の値に換算して表示する仕組みとなっている。



図2. 蒸留液計測部



図3. 振動式密度センサ

*1 沖縄オートメーション株式会社

表1. 振動式密度センサ仕様

メーカー・型式	CBC(株)・FDM-50A	
測定方法	振動共振式	
測定範囲	密度	0.5~2.5g/cm ³
	温度	-10~70℃
測定精度	密度	±0.001g/cm ³
	温度	±0.2℃
表示	密度	LED4桁
	温度	LED3桁
出力	密度・温度	4-20mA出力
電源	AC100~240V、50/60Hz	
寸法	φ70×139mm (プローブ)	

自動蒸留システムの制御フローを図4に示す。シーケンサではセンサによって測定された留出液の密度および温度からアルコール濃度を算出している。また、シーケンサ内には予め蒸留曲線の近似式も入力し、内部タイマを用いて刻々と変化する目標濃度の算出も行っている。デジタル調節計では、シーケンサにおいて算出したアルコール濃度と目標濃度を比較し蒸気バルブの適切な開度を求めている。例えば、目標濃度に比べアルコール濃度が高い場合は、蒸気バルブを開きモロミの加熱蒸気量を多くするなどの調整を行っている。

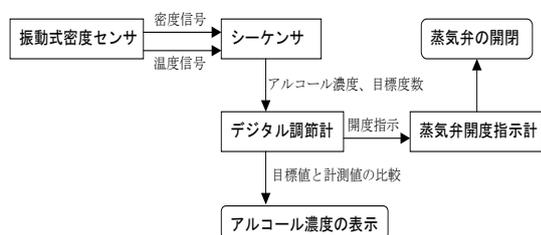


図4. 制御フロー

シーケンサによるアルコール濃度の算出は、次のような手順で行っている。

- ①国際法定計量機関(OIML)から示されたエタノール水溶液の密度に関する表から換算曲線を作成し、密度と温度の計測値からアルコールの質量%濃度を算出する。
- ②次式により質量%濃度から15℃時の容積%濃度を算出する。

$$15^\circ\text{Cの容積\%濃度} = \left[\frac{X/Y}{\left[\frac{(100-X)/Z}{Z} \right] + [X/Y]} \right] \times 100$$

ここでX: 質量%濃度、Y: 15℃のアルコール密度、Z: 15℃の水の密度である。

アルコール溶液(濃度10~50度)を用いた換算精度の確認試験では、浮標を用いて測定した度数を真値とした場合、誤差-0.2~2.3度であることが示された。

2-2 目標曲線

蒸留実験で使用する目標曲線を図5のように3種類設定した。曲線①は基準となる蒸留曲線として「循環式蒸留機による泡盛モロミの蒸留経過例」¹⁾を参考に定めたものである。曲線①を基準とし、より勾配の大きいものを曲線②、勾配の小さいものを曲線③と設定した。それぞれの曲線を次のように三次曲線で近似しシーケンサ内部の処理に用いた。

曲線① $Y=0.000038X^3-0.00874X^2-0.0709X+71.2$
 曲線② $Y=0.000055X^3-0.00733X^2-0.4531X+71.2$
 曲線③ $Y=0.000020X^3-0.00660X^2-0.0050X+71.2$

ここで、Y: 目標濃度、X: 蒸留時間(分)である。

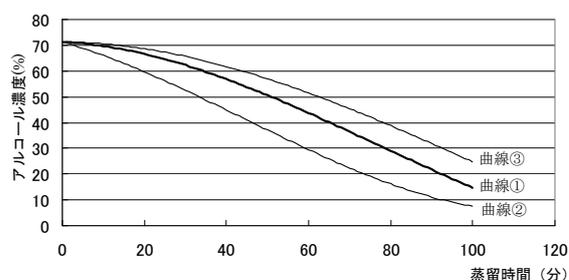


図5. 目標曲線

2-3 成分分析

2-3-1 サンプル調整

蒸留した泡盛はアルコール度数が44度になるよう加水したのち、室温下で0.45μmのメンブレンフィルターにてろ過したものを各種分析と官能評価試験に用いた。

2-3-2 酸度、紫外外部吸収およびTBA価

国税庁所定分析法に準じ測定した。

2-3-3 フェノール化合物

成分の抽出および濃縮はSep-PakC18を用いて行い、フェルラ酸、4-ビニルグアヤコール(4VG)、バニリンおよびバニリン酸について高速液体クロマトグラフ(HPLC)で測定した。測定は小関ら²⁾の方法に準じ、以下の条件で行った。

HPLC 分析条件

システム: LC-ADvp (島津社製)

カラム: Wakosil-II5C18 (和光純薬社製)、
内径 4.6mm、全長 250 mm

移動相 : A液 0.1%リン酸、 B液 メタノール
 送液 : B液 30%→70% (35分) リニアグラジエント
 検出器 : SPD-M10Avp (島津社製)

2-3-4 脂肪酸

脂肪酸分析用蛍光試薬 (9-anthryldiazomethane : ADAM、フナコシ株式会社製) を用い、図6に示す手順で誘導体化した後、HPCLにて測定した。



図6. ADAMを用いた脂肪酸誘導体化手順

2-3-5 エステル類

分析には各泡盛試料をアルコール度数20度になるよう加水したものをを用いた。分析装置および分析条件は既報³⁾に準じて行った。香气成分の同定は質量スペクトル及び標準物質により行い、定量値は標準物質を用いた検量線より算出した。

2-4 官能検査

2-4-1 酒の識別

20名の審査員で行った。評価は1 : 2点識別法⁴⁾を用いた。

2-4-2 酒質評価

5名の審査員で、それぞれ基準となる酒に対して味と香りの評価を行った。審査員には基準の酒を味見してもらったのち、試料名を伏せて比較試料を提示し、基準の泡盛を0とした場合の比較対象泡盛の香りおよび味の差を、-2 (軽い)、-1 (やや軽い)、0 (差なし)、+1 (やや重い)、+2 (重い) の5段階から選ぶ手法を用いた。この得点を官能評価の必須項目とし、さらに香味の指摘項目として甘い、華やかななどの項目を設定した (表2)。

表2. 酒質評価



3 実験結果と考察

3-1 蒸留の制御

蒸留実験には200kgの麴を最高温度26°Cの条件で発酵させたモロミを使用した。モロミの張り込み量は40%とした。蒸留はアルコール濃度が10度になるまで続け、初留濃度から15度、15~10度の2つに分けて保存し酒質評価に用いた。

目標蒸留曲線として曲線①を用いた場合の制御結果を図7に示す。蒸留中のバルブ開度が細かく変化していることが分かる。ここでは制御精度を一般的な誤差の指標である二乗平均の平方根 (RMS値) を用いて次式により算出した。

$$\text{制御精度 (RMS値)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (A_n - B_n)^2}$$

ここで、N : 計測数、An : n回目における計測濃度、Bn : n回目における目標度数である。

曲線①の場合、制御精度 (RMS値) は1.68であった。次に曲線②を用いた場合の結果を図8に示す。初留アルコール濃度は、使用するモロミによって若干変化するため、蒸留中の初留アルコール濃度を計測し、目標蒸留曲線のy切片として用いることにした。これにより図6で見られたような蒸留開始時における目標濃度と測定濃度との差が解消された。またアルコールの留出直前に蒸気バルブの開度を半分まで絞るといった工夫も行っている。これはモロミの加熱度合いが大きい場合、蒸留曲線の減少勾配が大きくなるため、アルコールの留出後に蒸気量の制御を始めてもなかなか曲線の減少幅を小さくすることができないためである。以上のような工夫を行った結果、曲線②における制御精度 (RMS値) は1.17となった。

曲線③を用いた場合の結果を図9に示す。蒸留開始後しばらくの間は、曲線の勾配が緩やかであるため、バルブを殆ど閉じた状態が続いている。モロミを加熱する度

合いが小さいため蒸留時間も120分を超える長さになった。そのためかセンサ部温度が上昇している。曲線③における制御精度(RMS値)は1.09となった。

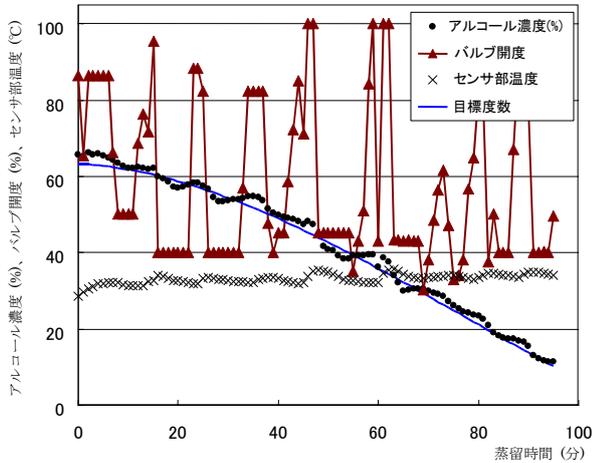


図7. 蒸留実験の結果 (曲線①)

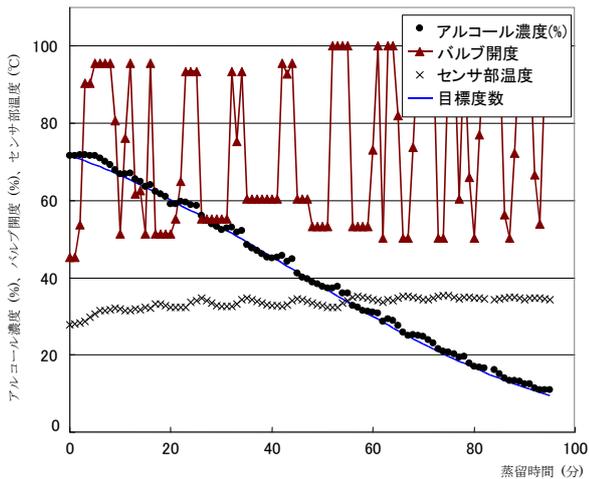


図8. 蒸留実験の結果 (曲線②)

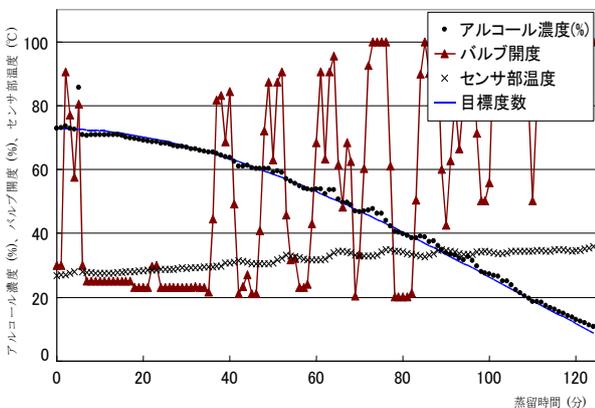


図9. 蒸留実験の結果 (曲線③)

3-2 酒質分析

3-2-1 酸度、紫外外部吸収およびTBA価

酸度は一般に味の濃淡に関わるとされ、酸度が高いと味が濃醇となる傾向にあることが知られている。また、TBA価は油成分（不飽和脂肪酸エチルエステル）の酸化度を示す指標で、一般にこの数値が大きいほど油臭が強くなるとされているが、少量なら香味に幅を与えるとされている。

表3の結果から、蒸留曲線勾配を変化させることにより酸度とTBA価に差が現れ、曲線③の酒質は濃厚なタイプとなり、曲線②では淡麗な酒質となると予想された。

また、紫外外部吸収は主としてフルフラールと相関のある値である。フルフラールは蒸留工程の後半に多く留出することから、蒸留時間が長い場合や後留成分が多いほど含有量が多くなる。曲線③では蒸留曲線勾配を小さくすることで蒸留時間が長くなった結果、後留成分が多く含まれたと考えられた。

表3. 蒸留曲線勾配と酸度、紫外外部吸収およびTBA価

	曲線①	曲線②	曲線③
酸度	1.6	1.0	1.8
紫外外部吸収	1646.8	2055.5	1122.8
TBA価	788.1	948.1	267.6

3-2-2 フェノール化合物

泡盛古酒香成分の1つとして知られるバニリンは、原料米中に含まれるフェルラ酸が加熱や酸化で4-ビニルグアヤコール（4VG）となり、更にバニリン、バニリン酸へと変化すると推定されている。蒸留曲線の異なる泡盛でこれら4成分の濃度を確認した結果、表4に示すようにすべてのサンプルでバニリンが検出され、特に曲線②において高い値を示した。

一方、バニリンの前駆体となる4VGは曲線②および③で検出された。泡盛蒸留過程における4VGの量については、試留装置を用いたモロミ蒸留試験で後留部分に多く、また加熱時間が長くなることで多くなる⁵⁾ことが報告されており、曲線③の結果は加熱時間が長くなることによるものと考えられた。また、曲線②では蒸留出口での流出速度が通常よりも速く、後留部分が含まれやすい状況にあったと推測された。4VGはフェノール様の香りを持ち、ワインなどでは異臭の1つとされることがあるが、泡盛においては貯蔵中のバニリンへの変化が期待されることから、製麹条件の検討などによる古酒用原酒泡盛の製造⁶⁾も試みられている。本研究の結果、蒸留曲線勾配を変化させることにより、貯蔵用や一般酒など、用途別の原酒を作ることができる可能性が示唆された。また、

フェルラ酸およびバニリン酸はいずれの条件でも検出限界以下であった。

表4. 蒸留曲線勾配の異なる泡盛中のフェノール化合物濃度

	濃度(ppm)			
	バニリン	4VG	フェルラ酸	バニリン酸
曲線①	0.117	—	—	—
曲線②	0.164	0.487	—	—
曲線③	0.131	0.349	—	—

—:検出限界以下

3-2-3 脂肪酸

図10に各曲線での脂肪酸組成を示した。これら脂肪酸のうち、低級脂肪酸は強い刺激臭を、分子量の大きな脂肪酸では弱い酸臭を呈する。

ろ過前の本格焼酎に存在する不飽和脂肪酸などの油性成分は、長期間の保存中に酸化分解し、油臭と呼ばれる不快なおいを発することが明らかとなっている。今回分析に用いた泡盛はろ過処理を行ったが、曲線②に比べ曲線③で低級脂肪酸の1つであるイソ吉草酸と、不飽和脂肪酸であるリノール酸の濃度に有意な差が認められた。したがって、曲線②と曲線③では、蒸留直後および貯蔵後の酒質にも違いが出る可能性が示唆された。9成分の脂肪酸量の合計値を比較すると、曲線②が12.83ppmと最も低く、ついで曲線①が14.88ppm、曲線③が16.55ppmであり、TBA値の結果とも一致した。

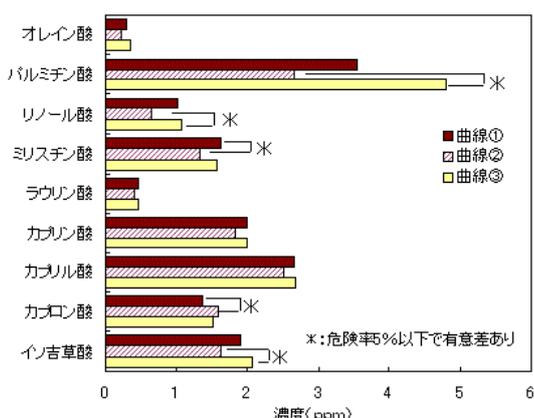


図10. 蒸留曲線勾配と脂肪酸濃度

3-2-4 エステル類

エステル類は果実様や花様の香りを呈するものが多く、酒質のうち香りに大きく影響する成分である。泡盛中のエステル類11成分を定量した結果を表5に示した。この

結果より、蒸留曲線勾配を大きくすることでこれらエステル類が多く含まれた酒を蒸留できる可能性が示唆された。エステル類のうちカプロン酸エチルは清酒の吟醸香の一つとされており、清酒ではカプロン酸エチルを多く生産する酵母の研究も多い。また、カプリル酸エチル、カプリン酸エチルはそれぞれ果実様の、酢酸βフェネチルはバラ様の香りを呈する。曲線②と曲線③を比較すると、曲線②のエステル量は少ないものの、バナナ様の特徴的な香りを呈する酢酸イソアミルは最も高い値を示した。このように蒸留曲線勾配の異なる3つの酒はエステル組成が異なっており、各成分の香気特性は、それぞれの酒の酒質に影響するものと考えられた。

表5. 蒸留曲線勾配の異なる酒のエステル濃度

	曲線①	曲線②	曲線③
酢酸イソアミル	3.688	6.755	3.208
カプロン酸エチル	1.090	1.084	1.424
カプリル酸エチル	3.662	3.990	5.607
カプリン酸エチル	3.042	2.532	3.930
酢酸βフェネチル	1.130	1.738	1.149
ラウリン酸エチル	1.074	1.489	1.528
カプリン酸イソアミル	0.072	0.104	0.076
ミリスチン酸エチル	1.964	2.550	2.594
パルミチン酸エチル	7.520	3.729	17.831
オレイン酸エチル	0.239	0.243	0.398
リノール酸エチル	1.503	1.422	2.781

(単位: ppm)

3-2-5 官能検査

蒸留条件の異なる泡盛についてそれぞれ識別可能かどうかを明らかにするため、1:2点識別法を用いた。1:2点識別法では、比較する2検体の差が大きいほど高い正答率が得られ、結果の有意性は検定により判断される。その結果表6に示したように、蒸留曲線②と③で有意に差が確認され、蒸留曲線勾配を変えることで香りに差が現れることが示された。

表6. 蒸留曲線勾配の異なる酒のにおい比較 (1:2点識別法による)

		正答率 (%)
曲線①	VS 曲線②	55.0
曲線②	VS 曲線③	67.5 *
曲線③	VS 曲線①	50.0

*:危険率5%以下で有意

次に、曲線①を基準として、曲線②および③の酒質を評価した。表7に示したように曲線②は曲線①に比べて香りは軽く、味はやや重い傾向にあると評価され、曲線③では曲線①に比べ香りも味もやや重い傾向にあると評

価された。これは酸度の結果とも一致した。曲線②と③ではイソ吉草酸濃度にも差が認められたが(図9)、官能評価では指摘されなかったことから、濃度が閾値以下であるか、他の成分によるマスキング効果により識別されていないためと考えられた。

また、曲線②における酢酸イソアミルの濃度(表5)は清酒における弁別閾値(270ppb)より十分高く、酢酸イソアミルの香りはバナナ様を呈することから、曲線②が「華やか」と指摘されたことの要因の1つと考えられた。

表7. 蒸留曲線勾配の異なる酒の酒質評価

		審査員1	審査員2	審査員3	審査員4	審査員5
曲線②	香り	-1	0	-2	-1	-1
	味	-1	0	2	1	1
曲線③	香り	1	1	-2	1	1
	味	1	0	1	1	2

指摘項目別評価

		指摘項目
曲線②	香り	甘い:2名、華やか:2名
	味	まろやか:4名、甘い:1名
曲線③	香り	指摘なし
	味	甘い:2名、まろやか:1名、辛い:1名

4 まとめ

予め設定した蒸留曲線に沿って自動的に蒸留を行うシステムを開発することができた。勾配の異なる3つの曲線を用いた蒸留実験では、酒質の変化を確認することができた。蒸留曲線の勾配が大きい場合は、エステル類が多く華やかもしくは甘い香りを持つ、まろやかな味の酒となり、逆に蒸留曲線の勾配が小さい場合は4VGを多く含む酒となることが明らかとなった。このことは、泡盛が蒸留後数ヶ月の貯蔵を経て飲まれる一般酒と、貯蔵熟成を経た古酒という2タイプの飲まれ方があることを考慮すると、それぞれの目的に応じた酒を、蒸留曲線の勾配を変化させることにより製造できることを示しているものといえる。泡盛製造現場では、蒸留曲線のコントロールを加熱蒸気量の調整という形で行っており、経験的には蒸留が酒質に影響することが知られていたが、成分分析と官能評価を行うことにより、因果関係がある程度明らかにされた。また、表には示さないが、蒸留曲線勾配を大きくすることで、アルコール取得率が向上する可能性も示された。

開発した自動蒸留システムは、蒸気バルブの操作履歴等を記憶することが可能であるため、蒸留時の温度や湿度等の環境条件、モロミの状態といった情報と関連付けることで、現場における蒸留作業をサポートする品質管

理ツールとしても応用が可能だと考えている。

謝辞

本研究は、平成20年度沖縄イノベーション創出事業において財団法人南西地域産業活性化センター(管理法人)、沖縄オートメーション株式会社、ヘリオス酒造株式会社(アドバイザー)と共同で行ったものです。関係者の方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 日本酒造組合中央会: 本格焼酎・泡盛(第II編)、p33(1991)
- 2) 小関卓也、伊東康朗、伊藤清、岩野君夫、蓼沼誠、醸協、89、p 408(1994)
- 3) 比嘉賢一、玉村隆子、西平守智、照喜名重智、村田亮、池間洋一郎、沖縄県工業技術センター研究報告書、第10号、p 31(2008)
- 4) 佐藤信「官能検査入門」第7刷、日科技連出版社、東京、p53(1993)
- 5) 福地香、比嘉賢一、沖縄県工業技術センター研究報告書、第3号、p 25(2001)
- 6) 福地香、田村博三、比嘉賢一、沖縄県工業技術センター研究報告、第2号、p 77(2000)

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターに

ご連絡ください。